

制振用高硬度ゴムの静的・動的载荷実験と時刻歴解析法

STATIC/DYNAMIC TESTS OF HIGH-HARDNESS RUBBER FOR RESPONSE CONTROL AND ITS TIME HISTORY ANALYSIS METHOD

笠井和彦*¹, 西澤恵二*², 大木洋司*³, 田中克往*⁴,
田中和宏*⁴, 西本晃治*⁵, 山崎久雄*⁶

Kazuhiko KASAI, Keiji NISHIZAWA, Yoji OOKI, Yoshimichi TANAKA,
Kazuhiro TANAKA, Kohji NISHIMOTO and Hisao YAMAZAKI

This paper proposes a time-history analysis model of high-hardness rubber that was recently developed for seismic vibration control of structures. The model combines elasto-plastic, visco-elastic, and nonlinear viscous constitutive rules. The rubber mechanical properties depend on frequency, temperature, and strain amplitude. The dependencies are effectively modeled through findings of their equivalencies. The nonlinearities under the idealized harmonic loading as well as random loading are carefully considered in the model. The model shows excellent accuracy over a wide range of temperature, frequency, and shear strains of a variety of histories.

Keywords : High-hardness rubber, Temperature sensitivity, Frequency sensitivity, Strain sensitivity, Temperature-frequency equivalency, Strain-frequency equivalency, Temperature-strain equivalency

高硬度ゴム, 温度依存性, 振幅依存性, 振動数依存性, 温度・振動数等価性, 振幅・振動数等価性, 温度・振幅等価性

1. はじめに

1. 1 背景

地震時の建物応答を軽減する制振部材に、様々な粘弾性材料^{1),2)}が用いられている。せん断変形を瞬時に熱エネルギーに変換する粘弾性材料の性能を利用し、風揺れや交通振動のような微小な揺れから大地震まで、さまざまな揺れを吸収・制御することが可能である。

このような材料の減衰効果は、分子運動により仕事を吸収することにより、そのため疲労強度は高いが、一方で力学特性が温度に依存する結果ともなり、低温時に硬化することで、制振部材の力、周辺部材への伝達力が過剰となる可能性がある。また、材料が線形型^{3),4)}であれば、信頼性が高く評価が容易である反面、大変形で力が増大する。

以上は、粘弾性材料を用いた制振設計の自由度を狭める要因となっており、その解決のため、制振部材の物理的組み合わせや、材料の新たな化学的配合^{5),6)}などにより、温度依存性の軽減、そして非線形型の特性による力の制御が提案されている。

1. 2 高硬度ゴム粘弾性体の開発

粘弾性材料の開発では、温度依存性の軽減は一般に減衰効果の犠牲に繋がるといふ、宿命的な問題と取り組まなければならない。最近開発された、いわゆる高硬度ゴムの場合、天然ゴムに多量のシリカやカーボンを添加し、上記の犠牲を極力回避する工夫がなされている。また、これら添加物により材料の弾性剛性は高く、典型的な粘弾性材料と比べ100倍程のオーダーである。

よって、数%程度の小さなせん断歪で荷重が立ち上がり、それ以上の変形に対しては軟化による非線形挙動に移り、荷重の更なる上昇が抑えられることが、本材料の特徴である。また、その荷重・変形関係は、弾塑性履歴と粘性履歴の両者からなる。

1. 3 時刻歴解析手法

弾塑性履歴もしくは粘性履歴のみをもつ材料の解析手法は、今日までに多数構築されてきたが³⁾⁻⁷⁾、両種の履歴を併せもつ材料の解析手法は数少ない。実務では、本ゴム材料と類似した、いわゆる高減衰ゴムの解析に、弾塑性履歴のみを考慮した解析⁸⁾も見受けられるが、一般に、減衰性能の高い材料には、粘性履歴および振動数・温度依存が存在し、その再現が解析精度の鍵となる。

弾塑性・粘性履歴の両者をもつ粘弾性材料の解析手法には、曾田ら⁹⁾による、線形バネ・ダッシュポットと非線形バネを組合わせたモデルを用いたものがある。また、笠井ら^{4),6)}は分数微分構成則で表わした粘弾性体と、非線形バネを用いたモデルを提案した。これらの対象は、本高硬度ゴムより格段に低い弾性剛性をもち、かつ、弾塑性履歴の寄与が小さい粘弾性材料である。来田ら¹⁰⁾は、高減衰ゴムのモデルとして、曾田らとは異なるバネ・ダッシュポットの組合わせにより両履歴を模擬したが、温度依存性の検証や、粘性履歴が非線形である場合などの考慮は行っていない。谷ら¹¹⁾は、本高硬度ゴムに最も近い材料を対象として、高硬度ゴムの先駆的な研究を行った。骨格曲線により弾塑性履歴をモデル化し、それに非線形粘性を付加する手法を用

*¹ 東京工業大学建築物理研究センター 教授・Ph. D

*² 東京工業大学人間環境システム専攻 大学院生

*³ 東京工業大学都市地震工学センター 特任助教

*⁴ 住友ゴム工業(株) ハイブリット事業本部

*⁵ 新日鉄エンジニアリング(株)建築・鋼構造事業部

*⁶ ユニオンシステム(株)振動解析プロダクト

Prof., Struct. Eng. Res. Center, Tokyo Institute of Technology, Ph. D.

Grad. Student, Dept. of Built Environment, Tokyo Institute of Technology

Assistant Prof., Center for Urban Earthquake Eng., Tokyo Institute of Technology

Hybrid Rubber Products Headquarters, Sumitomo Rubber Industries, Ltd.

Building Construction & Steel Structures Div., Nippon Steel Engineering

Dynamic Analysis Research Complex, Union System Inc.

いたが、荷初期や急な速度変化による荷重の立ち上がり、変形ゼロの近傍で細くなる履歴、温度依存性などは考慮していない。

1. 4 本論文の目的と構成

以上より本論文の目的は、高硬度ゴムの振幅依存性、振動数依存性、温度依存性のすべてを考慮した時刻歴解析法を提案することである。

2章では、実験概要と、実験結果より得られる高硬度ゴムの履歴形状の特徴について説明する。3章では、弾塑性履歴を静的応力要素でモデル化し、また、その温度・振幅等価性を述べる。4章では、粘性履歴を動的応力要素でモデル化し、また、その温度・振幅・振動数等価性についても述べる。5章で解析精度を検証する。なお、本手法では、初期温度への依存は考慮するが、荷中の温度上昇の影響は無視している(付録1)。

2. 実験

2. 1 実験概要

高硬度ゴムの性能を把握するために、様々なせん断荷試験を実施した。図1(a)の如く、試験体は8mm厚の高硬度ゴムの40x40mmの2面を鋼板に接着したものである。実験ではこれを2体同時に用い、中央鋼板の両側に固定して2面せん断とする(図1(b))。試験体は、図1(a)のネジ穴を介してのボルト締めで外側治具に固定され、また、過度な圧縮力がかからないよう、外側治具同士をボルトで固定し、幅を一定間隔に保つようにしている(図1(b))。また、せん断方向に対する試験体のガタは、治具A,Bで固定し、試験体の回転は、外側治具及び治具A,B,Cで固定し、純粋なせん断試験となるようにしている(図1(b))。

ゴムの荷方向長さとの厚さの比は5であり、そこから得るせん断歪・応力関係は、より大きな比をもつ実際のダンパーにも成立することは確認した(付録2)。表1のごとく、様々な変位波形、歪振幅、歪速度、振動数、初期温度での変位制御荷を実施した。初期温度の

管理は高硬度ゴム内に挿入した熱電対で行った。各荷を説明する。

- (1) 単調荷: 歪速度一定の単調せん断荷で計4ケース。
- (2) 定振幅正弦波荷: 最大歪振幅を一定とした4サイクルの正弦波荷で、20°Cで1振幅×1振動数+3振幅×5振動数+1振幅×3追加振動数(表1注)および0°C, 40°Cそれぞれで4振幅×4振動数の計51ケース。
- (3) 漸増漸減荷: 歪振幅を±5, ±10, ±30, ±50, ±100, ±150, ±200%と漸増させた後、同様に漸減させる正弦波荷で計7ケース。
- (4) 漸減漸増荷: 歪振幅を±200, ±150, ±100, ±50, ±30, ±10, ±5%と漸減させた後、同様に漸増させる正弦波荷で計7ケース。
- (5) シフト荷: 歪ピークを+200, -100, +100, -200, +150, -150, +200%と変える正弦波荷で1ケース。
- (6) シフト漸増荷: +200%歪の後、その点から $\pm 2, \pm 10, \pm 20, \pm 60, \pm 100, \pm 200, \pm 300, \pm 400$ の漸増正弦波の荷で計2ケース。
- (7) シフト漸減荷: +200%歪の後、その点から $\pm 400, \pm 300, \pm 200, \pm 100, \pm 60, \pm 20, \pm 10, \pm 2$ の漸減正弦波の荷で計2ケース。
- (8) 地震応答波荷: 24階建の建物(固有振動数0.35Hz)に、JMA Kobe, El Centro, Taftの

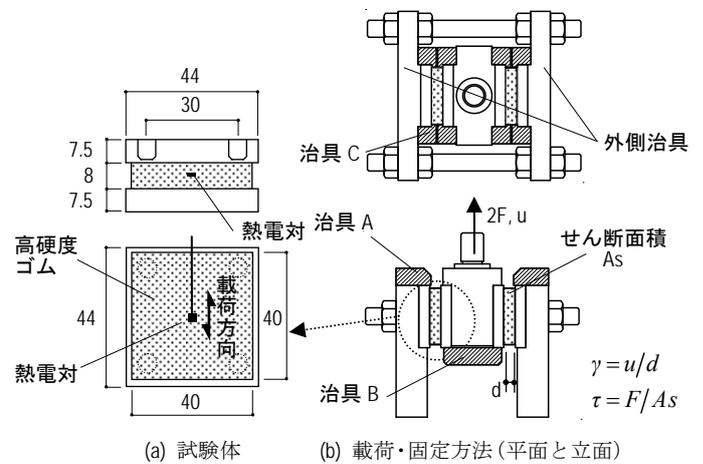


図1 試験体と荷・固定方法

表1 荷波形パターン

荷方法	荷時刻歴 $\gamma(t)$	歪振幅または速度	温度と振動数	試験体数
単調		歪速度0.00125, 0.0125, 0.125, 1.25 1/sの4種	20°C	4
定振幅正弦波		$\gamma_{peak} = \begin{pmatrix} +10 \\ -10 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} +50 \\ -50 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} +100 \\ -100 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} +200 \\ -200 \end{pmatrix}$ %の4種	20°C : 0.001, 0.1, 0.3, 1, 3 Hz 0°, 40°C : 0.001, 0.1, 1, 3 Hz	3x1x5+4+ 4x2x4=51
漸増漸減		$\gamma_{peak} = \begin{pmatrix} +5 \\ -5 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} +200 \\ -200 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} +5 \\ -5 \end{pmatrix}$ %	20°C : 0.001, 0.1, 0.3, 1, 3 Hz 0°, 40°C : 0.001 Hz	5+2x1=7
漸減漸増		$\gamma_{peak} = \begin{pmatrix} +200 \\ -200 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} +5 \\ -5 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} +200 \\ -200 \end{pmatrix}$ %	20°C : 0.001, 0.1, 0.3, 1, 3 Hz 0°, 40°C : 0.001 Hz	5+2x1=7
シフト		$\gamma_{peak} = \begin{pmatrix} +200 \\ -100 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} +100 \\ -200 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} +150 \\ -150 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} +200 \\ 0 \end{pmatrix}$ %	20°C : 0.001 Hz	1
シフト漸増		$\gamma_{peak} = \begin{pmatrix} +200 \\ +198 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} +200 \\ -200 \end{pmatrix}$ %	20°C : 0.001, 1 Hz	2
シフト漸減		$\gamma_{peak} = \begin{pmatrix} +200 \\ -200 \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} +200 \\ +198 \end{pmatrix}$ %	20°C : 0.001, 1 Hz	2
地震応答波		歪振幅ランダム JMA Kobe, El Centro, Taftの3地震応答波	20°C : 24層建物1階応答(動的・静的) 0°, 40°C : 24層建物1階応答(動的)	3x1x2+ 3x2x1=12

注) 全試験体は、事前に初期剛性除去荷を行った(2.1節、付録1)。

定振幅正弦波荷では、20°Cでの $\gamma_{peak} = \pm 10\%$ は、1Hzのみ試験した。また、20°Cの $\gamma_{peak} = \pm 100\%$ は0.01, 10, 15Hzも試験した。

各波が入力されたときの1階応答波形³⁾の最大歪振幅を200%に調整した載荷9ケース、時間を300倍に伸ばした低速な載荷3ケース、計12ケース。

なお、表1のように初期温度は0, 20, 40℃の3種である。単調載荷(1)での一定歪速度は0.125%/秒~125%/秒の範囲、地震応答波載荷(8)での最大歪速度は1.87%/秒と677%/秒、それら以外の載荷(2)~(7)では、歪振幅10%の場合に最大歪速度0.06%/秒~188%/秒(0.001Hz~3Hz)、歪振幅200%の場合に最大歪速度1.26%/秒~18,850%/秒(0.001Hz~15Hz)である。また、静的挙動の把握には、履歴曲線が振動数と歪速度の変化に殆ど影響されず、かつ時間的に可能な載荷を事前実験で検討した。この結果、上記のうち振動数を指定する載荷(2)~(7)で振動数0.001Hz、速度を指定する載荷(1)で一定歪速度0.125%/秒、載荷(8)で最大歪速度1.87%/秒の載荷を「静的載荷」として行った。それ以外は「動的載荷」と呼ぶ。因みに、本ゴム材料では±200%を使用限界歪とするため(付録3と3.4節)、実験と解析もその範囲を対象とする。

ところで本高硬度ゴムは、免震用高減衰ゴムと同様、製造後に初めて経験するせん断変形では非常に大きな初期剛性を示す。これは、製造時に内部残留する応力や分子間の絡みなどから発現すると考えられ、一度変形を経験した後に解消され、以降の剛性が安定することがわかっている(付録4)。よって、この製品は初期剛性除去のための載荷の後、出荷されている。これに従い本試験体にも、付録4の載荷方法で初期剛性を除去してから実験を行った。ただし、実験での各載荷の開始時に、初期剛性除去時よりも穏やかだが、歪速度により応力が立ち上がり(付録4と4.3節)、本解析法ではそれもモデル化する。

2. 2 実験結果

実験より、本高硬度ゴムが振幅・振動数・温度に依存することが分かった。振幅が増えると軟化し(図2(a))、振動数が増えると硬化し(図2(b))、温度が高いと軟化する傾向がある(図2(c))。また、静的載荷でも履歴が膨らみをもち(図2)、エネルギー吸収量が多いという点で、振動数依存する他の高分子系材料^{1)~6)}と対照的だと言える。

以上より、本高硬度ゴムのモデル構成は、歪・温度のみに依存して、静的応力成分 τ_s (図3(a))を再現する静的応力要素と、歪・温度・振動数に依存して、動的応力成分 τ_d (図3(b), 3(c))を再現する動的応力要素の並列体とする。また、後者は粘弾性要素と非線形粘性要素の並列体とし、それらの応力を $\tau_{d(ve)}$ 、 $\tau_{d(vs)}$ とする。つまり、

$$\tau = \tau_s + \tau_d = \tau_s + \tau_{d(ve)} + \tau_{d(vs)} \quad (1)$$

静的応力要素、動的応力要素は、それぞれ3章、4章でモデル化する。

3. 静的応力要素

3. 1 静的応力要素の構成式

静的応力要素は、静的載荷結果に基づきモデル化を行う。図2, 図3(a)のように履歴曲線は紡錘型であり、鋼材の場合と似ているため、鋼材の履歴の再現に用いられるMenegotto-Pintoモデル⁷⁾と、筆者らが鋼材に関して提案したそのパラメータ同定法⁷⁾を採用する。

図4は、静的応力要素の履歴を示す。歪増分の正負符号が切替わる点を「反転点(point of strain reversal)」と定義し、2つの反転点を起点・終点とする履歴曲線を「半波」と呼ぶ。また、与えられた起点の歪・応力を (γ_r, τ_r) とし、半波1では原点(0,0)と考える。図4のように履歴曲線は各半波で2本の漸近線をもち、それら2本の勾配、交点

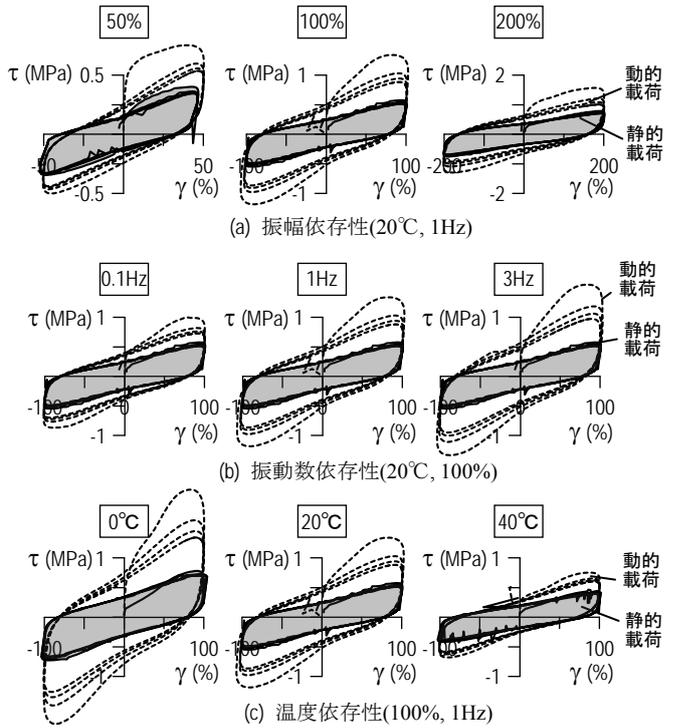


図2 高硬度ゴムの振幅、振動数、温度に対する依存性

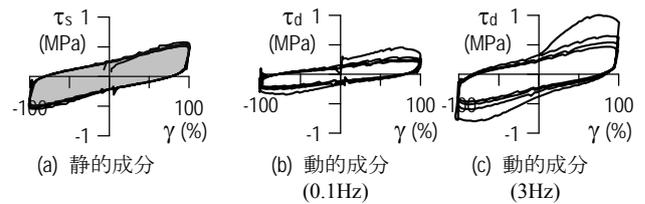


図3 静的成分および動的成分(20°C, 100%)

の歪値は、半波1で $G_{s1}, G_{s2,0}, \gamma_{a0}$ 、半波2以降で G_{s1}, G_{s2}, γ_a とする。現ステップの歪 γ から、静的応力成分 τ_s を次式により求める。

(半波1)

$$\tau_s = \lambda_{s0} \left[G_{s2,0} + \frac{G_{s1} - G_{s2,0}}{\{1 + (\gamma/\gamma_{a0})^R\}^{1/R}} \right] \cdot \gamma \quad (2a)$$

(半波2以降)

$$\tau_s = \lambda_{s0} \left[G_{s2} + \frac{G_{s1} - G_{s2}}{\{1 + (\gamma - \gamma_r)^R / (\gamma_a - \gamma_r)^R\}^{1/R}} \right] \cdot (\gamma - \gamma_r) + \tau_r \quad (2b)$$

$$\lambda_{s0} = p(\theta - \theta_{ref}) + 1 \quad (2c)$$

ここに、 R は曲線の曲率(図4)、 λ_{s0} は温度依存性を支配する(3.3節)。

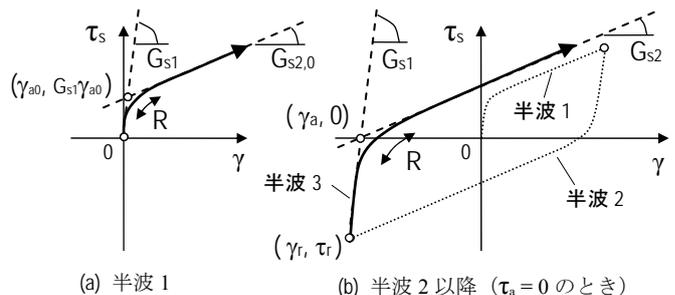


図4 静的応力要素のモデルパラメータの意味

なお、半波 1 では $|\tau_r|$ が 0.02MPa を超えるまで、式(2a)の $|\tau_s|=0.02$ にあたる点と原点を結ぶ直線の式を用い、完全な線形状態と考え、歪・応力がこの直線上にある限り、歪増分の正負が切替わっても反転とは考慮せず、半波 1 に留まったとみなす。これは、载荷前に生じ得る試験機の微動に対しモデルを安定させるためである。

また、半波 2 以降では、基本的に τ_a を次式(3a)のように 0 とするが、その曲線の起点において $|\tau_r| \leq 0.3$ かつ $\tau_r \dot{\gamma} \leq 0$ のとき次式(3b)から求め、 γ_0 値は次式(3c)から得て、式(2b)に代入する。

$$\tau_a = 0, \text{ or } \text{sgn}(\dot{\gamma})(0.15 - 0.5|\tau_r|) \quad (3a,b)$$

$$\gamma_a = \gamma_r + \text{sgn}(\dot{\gamma})|\tau_a - \tau_r|/G_{s2} \quad (3c)$$

図 4(a),(b)にそれぞれ半波 1、半波 2 以降 ($\tau_a=0$ のとき)を示す。以後、変数 G_{s2} , $\lambda_{s\theta}$ 値の設定をそれぞれ 3.2 節、3.3 節で述べ、定数 G_{s1} , $G_{s2,0}$, γ_0 , R , p の値は 3.4 節末尾に示す。

3. 2 静的応力要素における履歴漸近線の設定

図 4 の漸近線 2 本の傾き G_{s1} , $G_{s2,0}$ は定数で (3.4 節)、 G_{s2} は以下のように半波ごとに变化させる。漸増漸減载荷の実験結果 (表 1) を用い、各半波の G_{s2} を反転点 (起点) の応力絶対値 $|\tau_r|$ の関数で表す。ただし、 G_{s2} 値は歪振幅の漸増時と漸減時それぞれで G_{s2}^+ , G_{s2}^- の値をとる。図 5 に 20°C での各半波の例を示しており、小さな $|\tau_r|$ のとき $G_{s2}^- < G_{s2}^+$ の傾向が強い。これらより、

$$G_{s2}^+ = a_1|\tau_r|^2 + a_2|\tau_r| + a_3 \quad (\text{漸増時}) \quad (4a)$$

$$G_{s2}^- = b_1|\tau_r|^2 + b_2|\tau_r| + b_3 \quad (\text{漸減時}) \quad (4b)$$

ここに、 $a_1 \sim a_3$, $b_1 \sim b_3$ は定数で、その同定を 3.4 節で説明する。

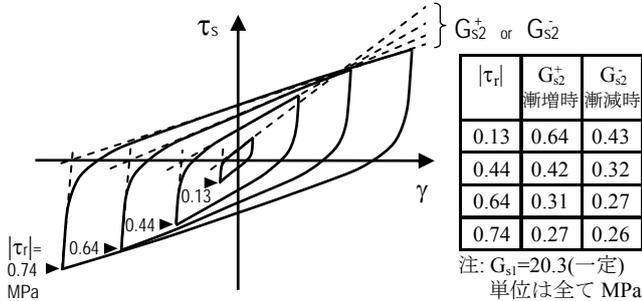


図 5 静的応力要素の $|\tau_r|$ と G_{s2} の関係

一方、ランダム载荷で歪が反転して新たな半波が始まる際、 G_{s2}^+ , G_{s2}^- のどちらを用いるか判断が必要である。基本的には、反転点の歪の絶対値 $|\gamma|$ が、過去の全反転点での歪の最大絶対値 $|\gamma|_{max}$ よりも大であれば、歪の漸増時と考え、 G_{s2}^+ を用いる。しかし、前半波で漸減時と考えられ G_{s2}^- を用いていた場合、現半波の起点の歪 $|\gamma|$ が $|\gamma|_{max}$ を僅かに越えるだけで現半波に G_{s2}^+ を用いると、漸近線の傾きが急激に変わり、不自然な履歴曲線となる。

よって、図 6 のように G_{s2} の値は、現半波の $|\gamma|$ 値によって場合分けしながら G_{s2}^- と G_{s2}^+ の値で補間して連続性をもたせる。つまり、

$$G_{s2} = G_{s2}^+ \quad (\gamma^+ \leq |\gamma_r|)$$

$$G_{s2} = G_{s2}^- + \frac{|\gamma_r| - \gamma^-}{\gamma^+ - \gamma^-} (G_{s2}^+ - G_{s2}^-) \quad (\gamma^- < |\gamma_r| < \gamma^+)$$

$$G_{s2} = G_{s2}^- \quad (\gamma^- \geq |\gamma_r|) \quad (5a-c)$$

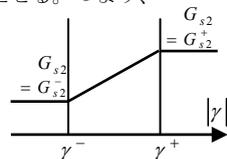


図 6 静的応力要素の漸増、漸減の定義

ここに、 γ^+ , γ^- は、それぞれ以下の値を用いる。

$$\gamma^+ = |\gamma_r|_{max}, \quad \gamma^- = 0.95|\gamma_r|_{max} \quad (\text{前半波が漸増時}) \quad (6a)$$

$$\gamma^+ = 1.05|\gamma_r|_{max}, \quad \gamma^- = |\gamma_r|_{max} \quad (\text{前半波が漸減時}) \quad (6b)$$

また、式(5a), (5c)を用いる現半波は、それぞれ漸増時、漸減時とみなし、式(5b)を用いる現半波は、式(6a), (6b)による場合それぞれで漸増時、漸減時とみなす。これらの情報は、次の半波で必要となる。

さらに解析精度を向上させるため、以下の条件を加える。

- ① 半波 2 では $G_{s2} = G_{s2}^-$ を用いる。
- ② 半波 2 以降で履歴曲線(式(2b))が、歪増分符号が同じ過去の履歴曲線 (延長線含む) や、同じと仮定して描かれる半波 1 履歴曲線 (式(2a))のどれかと交わる場合、その曲線に移行する (図 7(a))。
- ③ 起点(γ_r , τ_r)が、歪増分の符号が同じで過去最大の $|\gamma|$ を示した履歴曲線、その曲線の起点を通る水平線、そして横(歪)軸とで囲まれた領域にある場合、その曲線に用いた G_{s2} 値を採用する (図 7(b))。

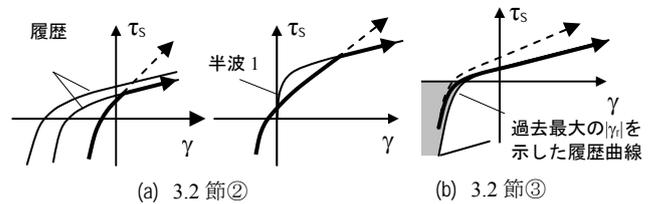


図 7 静的応力成分の制限方法

3. 3 静的応力要素における温度依存性の再現

式(2c)で定義した $\lambda_{s\theta}$ を説明する。図 2(c)で示したように、静的応力要素は、動的応力要素ほどではないが、無視できない温度依存性をもつ。ここで、各温度で得た異なる履歴曲線に対し、応力を基準化して較べると、それらはほぼ同一形状であることが判明した。

図 8 は、歪振幅 200%の静的载荷で、0, 20, 40°Cにおける応力 τ_s をそれぞれ $\lambda_{s\theta} = 1.38, 1.00, 0.59$ で基準化した結果を示す。0°C, 40°Cの履歴曲線が 20°Cと形状が等しくなることが分かる。つまり、任意温度での $\tau_s - \gamma$ 関係は、基準温度での $\tau_s/\lambda_{s\theta} - \gamma$ 関係と等しく、静的応力成分に温度と応力の等価性があるといえる。以後、 $\lambda_{s\theta}$ を静的シフトファクターと呼ぶ。基準温度 $\theta_{ref} = 20$ を考慮する。

さて、静的応力要素では、 $\lambda_{s\theta}$ を式(2c)で温度の関数とし、それを Menegotto-Pinto モデルの式(2a,b)に含んで τ_s の温度依存性を再現している。式(2c)で $\theta_{ref} = 20$ とするため、20°C で $\lambda_{s\theta} = 1$ であり、高温で $\lambda_{s\theta}$ が減少するよう $p < 0$ が設定される (3.4 節)。以上のように $\lambda_{s\theta}$ は、式(2a,b) のモデル剛性値 G_{s1} , G_{s2} , $G_{s2,0}$ にかかり、温度により応力の増減を行うが、一方で式(2a,b)の γ , γ_r にかかると解釈することもできる。つまり、上述の温度と応力の等価性に加え、温度と歪の等価性も存在すると考

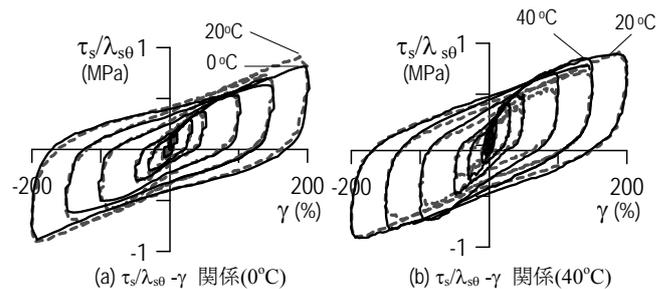


図 8 0°C(実線), 20°C(破線), 40°C(実線)での実験結果と静的シフトファクターを用いた応力-歪関係

えられる。紙面の都合で図示しないが、図8と対比して、 $\tau_s - \lambda_{s\theta}\gamma$ 曲線を描き、これを確認している。つまり、例えば低温 ($\lambda_{s\theta} > 1$) で得られた $\tau_s - \gamma$ 曲線の γ を $\lambda_{s\theta}\gamma (= \gamma_{eq})$ と増幅して描いた履歴曲線は、基準温度での $\tau_s - \gamma_{eq}$ 曲線と形状・大きさがほぼ一致する。よって、この特性を、静的挙動における「温度・振幅等価性」と呼ぶ。

3. 4 静的応力要素のパラメータ同定

静的応力要素に用いる定数は、 $G_{s1}, G_{s2,0}, \gamma_{s0}, R, p$ そして G_{s2} を決める $a_1 \sim a_3, b_1 \sim b_3$ であり、これらを基準温度 20°C での実験結果のみ用いて同定し、モデルを作成する。また、シフトファクターによって他の温度にも用いる (3.3 節)。

まず、20°C での漸増漸減载荷 (表 1) の結果を用いる。図 8 の 20°C での各サイクルで、応力-歪関係の実験値と計算値 (式(2b), $\lambda_{s\theta} = 1$) が最もよく合う G_{s1}, G_{s2}, R を最小二乗法にて同定する。その後、全サイクルで G_{s1}, R を平均値で固定し、再度 G_{s2} のみ各サイクルで同定しなおす。漸増時と漸減時それぞれで、得られた G_{s2} と $|\tau_r|$ の関係を求め、式(4)の $a_1 \sim a_3, b_1 \sim b_3$ を最小二乗法により同定する。

次に、20°C の単調载荷 (表 1) の結果を用いる。図 9 の 20°C の応力-歪関係の実験値と計算値 (式(2a), $\lambda_{s\theta} = 1$) を最もよく合わせる $G_{s2,0}, \gamma_{s0}$ を最小二乗法で同定する。なお、図 9 で 200% 以上の歪において顕著な硬化が認められるが、本材料の適用範囲が歪振幅 200% までであるため (2.1 節、付録 3)、そこまでの実験結果を用いて同定する。

最後に、0°C, 40°C での漸増漸減载荷 (表 1) を用いる。20°C と同様、漸増・漸減時で G_{s2} と $|\tau_r|$ の関係を求め、その後、 $G_{s2}/\lambda_{s\theta}$ と $|\tau_r|$ の関係を、20°C で求めた $a_1 \sim a_3$ 値, $b_1 \sim b_3$ 値からなるモデル式(4a), (4b) と極力一致するよう $\lambda_{s\theta}$ 値を最小二乗法で同定する。結果が図 10 に黒丸で示されており、それに式(2c)が合うよう p を最小二乗法で同定する。

以上より $G_{s1}, G_{s2,0} = 20.3, 0.28$ MPa, $\gamma_{s0} = 0.0197, R = 0.998, p = -0.02, a_1, a_2, a_3 = 0.41, -0.96, 0.76$, および $b_1, b_2, b_3 = 0.24, -0.49, 0.49$ となった。

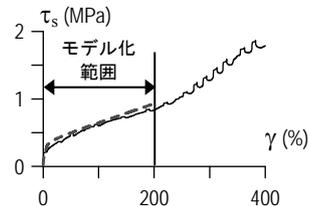


図 9 単調载荷の実験結果(—)とパラメータ同定結果(---)

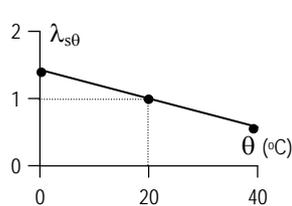


図 10 静的シフトファクターと温度の関係

4. 動的応力要素

4. 1 粘弾性要素と非線形粘性要素による表現

図 3(b),(c)は、動的応力要素の履歴曲線の傾き、つまり貯蔵剛性の振動数依存性を示し、それを粘弾性要素で再現する。さらに、速度依存や楕円と異なる履歴形状 (図 3(b),(c)) を考慮して、貯蔵剛性が無い非線形粘性要素を追加する。図 3 の履歴曲線が歪ゼロ近傍でくびれる傾向は、静的でなく動的応力要素のほうに著しく、速度に依存していたため、それも非線形粘性要素で表す。なお、歪振幅 20% ほどまでは、ほぼ静的応力成分が卓越するため、その領域での動的応力成分の再現精度は重視していないことを述べておく。

まず、粘弾性要素は、笠井らの分数微分構成則³⁾⁶⁾を簡略して次式で表し、その履歴形状は図 11(a)となる。

$$\tau_{d(ve)} = G_d (\gamma + bD^\beta \gamma) \quad , \quad b = b_{ref} (\lambda_{d\theta} \lambda_{d\gamma})^\beta \quad (7a,b)$$

ここに、 D^β は時間分数微分の演算子、 G_d, b_{ref}, β は振動数依存性を調節するパラメータである。また、 $\lambda_{d\theta}, \lambda_{d\gamma}$ は、温度および振幅依存性を粘弾性・非線形粘性要素共通に考慮するもので、

$$\lambda_{d\theta} = \exp \left[\frac{-p_1(\theta - \theta_{ref})}{p_2 + \theta - \theta_{ref}} \right], \quad \lambda_{d\gamma} = \exp \left[\frac{-p_3(\gamma^* - \gamma_{ref}^*)}{p_4 + \gamma^* - \gamma_{ref}^*} \right] \quad (8a,b)$$

と表す。明らかに、温度 θ が基準温度 θ_{ref} に等しい場合は $\lambda_{d\theta} = 1$ 、歪振幅 γ^* が基準振幅 γ_{ref}^* に等しい場合は $\lambda_{d\gamma} = 1$ である。 $\lambda_{d\theta}, \lambda_{d\gamma}, \gamma^*$ の詳細や $p_1 \sim p_4$ の同定については、4.2 節で説明する。

次に、非線形粘性要素は次式で表し、履歴形状は図 11(b)となる。

$$\tau_{d(vs)} = q_1 q_2 C_d (\lambda_{d\theta} \lambda_{d\gamma} |\dot{\gamma}|)^\alpha \cdot \text{sgn}(\dot{\gamma}) \quad (9)$$

ここに、 C_d は非線形粘性係数であり、 α は速度のべき乗数を示す。また、 q_1 は経験歪により非線形粘性要素の付加量を調整し、 q_2 は非線形粘性要素の履歴にくびれを設ける働きがある (4.3 節)。 q_1, q_2 の詳細や C_d, α の同定については 4.3 節で説明する。

以上、粘弾性要素、非線形粘性要素の履歴をあわせて図 11(c) の履歴曲線を得る。表 2 に、上記パラメータの値の一例を示す。これは、図 3(c) に示した 3Hz, 20°C, 歪振幅 100% の実験から得た動的成分のほうの履歴を再現している。次節以降でパラメータ同定法を述べる。

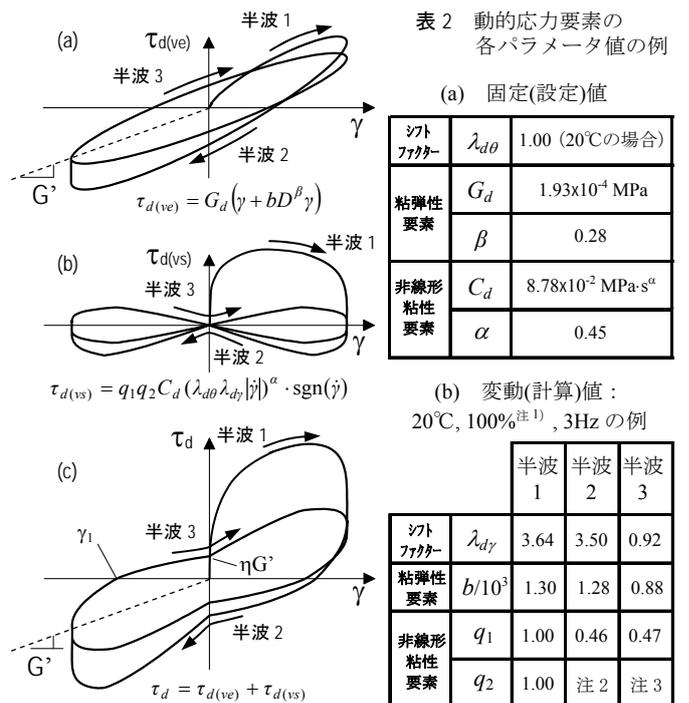


図 11 動的応力要素の応力-歪曲線

表 2 動的応力要素の各パラメータ値の例

(a) 固定(設定)値		
シフトファクター	$\lambda_{d\theta}$	1.00 (20°C の場合)
粘弾性要素	G_d	1.93×10^{-4} MPa
	β	0.28
非線形粘性要素	C_d	8.78×10^{-2} MPa·s ^α
	α	0.45

(b) 変動(計算)値: 20°C, 100%^{注1)}, 3Hz の例

		半波 1	半波 2	半波 3
シフトファクター	$\lambda_{d\gamma}$	3.64	3.50	0.92
粘弾性要素	$b/10^3$	1.30	1.28	0.88
非線形粘性要素	q_1	1.00	0.46	0.47
	q_2	1.00	注 2	注 3

注 1: 実験での反転歪 (0, 1.03, -1.04, 1.03) を用いた。
 注 2: 式(13)で $|\gamma| = 0.79$
 注 3: 式(13)で $|\dot{\gamma}| = 0.69$

4. 2 粘弾性要素の設定

粘弾性要素の構成則の式(7)におけるパラメータ G_d, b_{ref}, β の値を同定する。まず、定常応答の再現のため、定振幅の正弦波加振実験 (表 1) の応答履歴 2 サイクル目を用いた。図 12(a) の様に、実験から得た動的成分の履歴の最大変形時の割線剛性に粘弾性要素の楕円履歴の傾きを合わせるような同定は、他の時点で応力が実験値を上回り、後述の粘性要素が有効にならない。そこで図 12(b) の様に、動的成分の

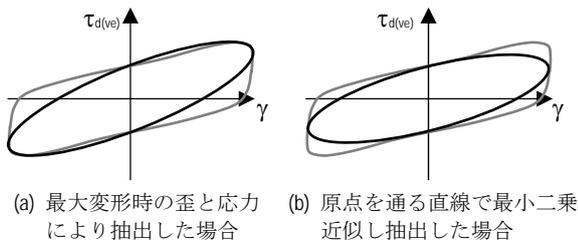


図 12 粘弾性要素が再現すべき貯蔵剛性 G' 値の抽出

履歴上の点を、原点を通る直線で最小二乗近似し、その傾きを粘弾性要素の楕円履歴の傾き、つまり貯蔵剛性の必要値 G' とした。

これ以後は、基準温度・基準振幅を 20°C, 100% とし、その場合を正確に模擬するため、他温度・振幅でも用いた振動数 $f = 0.001, 0.1, 0.3, 1, 3$ Hz のほか、 $f = 0.01, 10, 15$ Hz の追加実験も行った(表 1 注)。

式(7)の構成則に振動数 f の正弦波を入力したときの定常応答が理論的に得られ、その結果、貯蔵剛性の予測値が次式で与えられる³⁾。

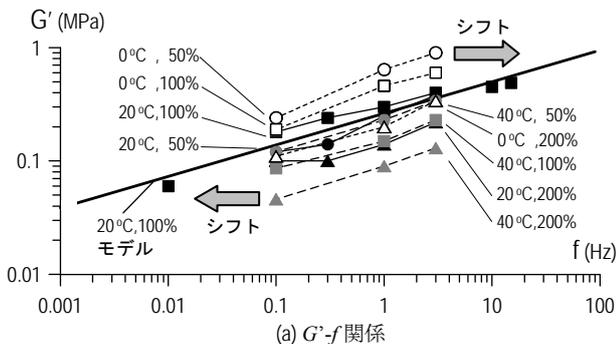
$$G' = G_d \{ 1 + b_{ref} (2\pi \lambda_{d\theta} \lambda_{d\gamma} f)^\beta \cos(\beta\pi/2) \} \quad (10)$$

ここに、 $G_d = 1.93 \times 10^4$ MPa, $b_{ref} = 902.5$, $\beta = 0.28$ であり、これらは上述の 20°C, 100% での各振動数から得た実験値 G' に、式(10)が合うよう(ただし $\lambda_{d\theta} = \lambda_{d\gamma} = 1$)、最小二乗法で同定した。図 13(a)の「モデル曲線」が同定後の式(10)を示す。また、他の温度・振幅では $\lambda_{d\theta}, \lambda_{d\gamma}$ は 1 ではなく、その場合も式(10)で予測できると考える。つまり、式(10)の $\lambda_{d\theta} \lambda_{d\gamma} f$ の項により、任意の温度・振幅・振動数の影響を、基準温度、基準振幅の場合、つまり $\lambda_{d\theta} = \lambda_{d\gamma} = 1$ の場合と同様に表現するもので、本材料でこれが可能であることを以下に示す。

図 13(a)のシンボルは、全温度・振幅での実験値 G' を示す。これらの点を、横軸(logf)に沿って平行移動させれば、図 13(b)のように「モデル曲線」にはほぼ一致する。そこで、温度、振幅それぞれに起因する移動量を $\log \lambda_{d\theta}, \log \lambda_{d\gamma}$ とおくと、 $\log \lambda_{d\theta} + \log \lambda_{d\gamma} + \log f = \log \lambda_{d\theta} \lambda_{d\gamma} f$ から、任意の温度・振幅において振動数 f での材料値は、基準温度・基準振幅における等価振動数 $\lambda_{d\theta} \lambda_{d\gamma} f (= f_{eq})$ での値に一致すると言える。

すなわち、本材料の動的挙動に「温度・振動数等価性」と「振幅・振動数等価性」が見られ、よって静的挙動と同様に「温度・振幅等価性」(3.3 節)も存在すると言え、これを本解析モデル(式(10), (7))が忠実に模擬している。以後、静的シフトファクター $\lambda_{e\theta}$ (3.3 節)と対比して $\lambda_{d\theta}, \lambda_{d\gamma}$ を動的シフトファクターとし、それらを実験から以下のように求める。

20°C, 100% 歪以外の温度、振幅の 4 振動数での実験値が式(10)に最も一致するよう $\lambda_{d\theta}$ と $\lambda_{d\gamma}$ を最小自乗法で同定する。これは、図 13 に



(a) G'-f 関係

示すように、基準温度・振幅のモデル曲線に対し、他の温度、振幅の結果が最も一致する移動量 $\log \lambda_{d\theta}, \log \lambda_{d\gamma}$ を同定することと同義である。表 3 に、実験値 $\lambda_{d\theta}, \lambda_{d\gamma}, (\lambda_{d\theta} \lambda_{d\gamma})$ を示す。また、 $\lambda_{d\theta}, \lambda_{d\gamma}$ それぞれに式(8a), (8b) が極力合うよう、式内の $p_1 \sim p_4$ を同定した結果、 $p_1, p_2, p_3, p_4 = -15.44, -195.9, 14.75, 6.21$ となった。図 14(a), (b) は、これら同定値を用いたモデル(式(8a,b)) が、実験(図中の黒丸)とよく合うことを示す。因みに、 $\lambda_{d\theta}$ で表される温度・振動数等価性は、数多くの粘弾性体に見られるが¹⁾⁶⁾、 $\lambda_{d\gamma}$ で表される振幅・振動数等価性は、本高硬度ゴムにおける特性であり、今まで適用された例はない。 $\lambda_{d\gamma}$ を用いることで、振幅による非線形性をも表現可能となり、モデルを少ないパラメータ数で表し、より簡便にすることに貢献している。

表 3 シフトファクター値一覧 ($\lambda_{d\theta}, \lambda_{d\gamma}$ の値)

温度	振幅		
	$\lambda_{d\theta}$	$\lambda_{d\gamma}$	$\lambda_{d\theta} \lambda_{d\gamma}$
0°C	4.18	3.64	15.22
20°C	1.00	1.00	1.00
40°C	0.17	0.63	0.17

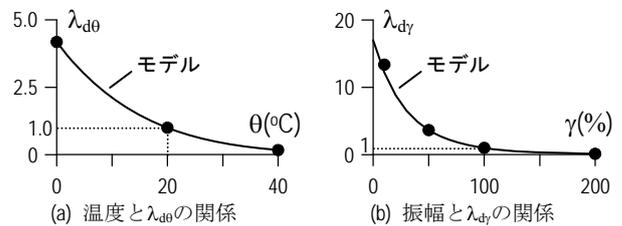


図 14 (a) 温度や(b) 振幅と動的シフトファクターの関係

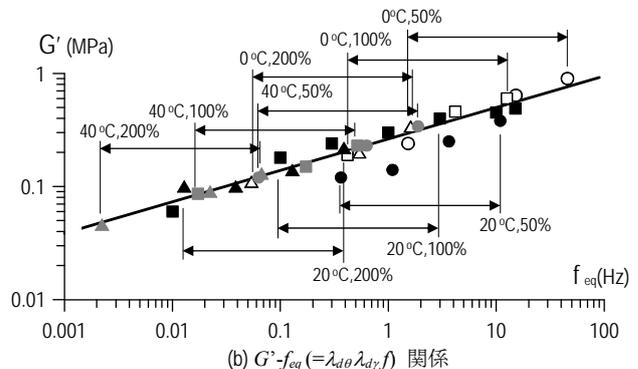
ところで、式(8b)中の γ^* は、上記パラメータ同定の際は、定振幅载荷での最大振幅を用いていたが、ランダム载荷にも対応するため、多くの試行錯誤的な検討を行った結果、以下の設定を提案する。

まず、初期载荷時は応力が大きくなるため、 γ^* に小さな値を用いればよく(図 14(b))、 $\gamma^* = 0.5$ とする。ここに、 $|\tau_r| > 0.1$ MPa を満足した後、歪が反転するまでは、それまでの半波全てを初期载荷と見なす。

また、その後の半波では以下の 2 つの場合に分かれる。

$$\gamma^* (\geq 0.5) = \frac{\gamma_{\max} - \gamma_{\min}}{2}, \text{ or } \frac{\gamma_{r,\max} - \gamma_{r,\min}}{2} \quad (11a,b)$$

ここで、 $\gamma_{\max}, \gamma_{\min}$ = 現ステップまでの最大・最小歪、 $\gamma_{r,\max}, \gamma_{r,\min}$ = 過去の全反転点での γ_r の最大・最小値である。初期载荷中もしくはそれ以降の半波において、 $(\gamma_{\max} - \gamma_{\min}) / 2$ が 0.5 を越えなかった場合、次の半波でも式(11a)を使い続け、越えた場合は、次の半波で式(11b)を用いる。



(b) G'-f_{eq} (= $\lambda_{d\theta} \lambda_{d\gamma} f$) 関係

図 13 粘弾性要素に用いるシフトファクターの意味

以上の考慮は、経験歪が小さな場合に応力が上昇し易い傾向を模擬しながら、急に大きな歪が与えられたときに、途中でそれを緩和するためにやっている(式(11a))。また、一方で、経験歪が大きくなったため、その後の歪振幅の増加があまり著しくないときは、動的応力の寄与分が安定するようにもしている(式(11b))。

4.3 粘性要素の設定

非線形粘性要素の構成則の式(9)におけるパラメータ q_1, q_2, C_d, α の説明と同定を行う。この要素は、静的応力要素(3章)、粘弾性要素(4.1~4.2節)の比較的安定した履歴特性に対比し、歪速度が急増したときや歪が経験歪を超えたときに応力が敏感に増して膨らむ履歴ループや、歪ゼロ付近で応力が減少してくびれる履歴ループを、材料特性に直接言及せず、便宜的に模擬するものである。式(9)の定数 C_d, α により、応力が速度の α 乗に比例する非線形粘性要素の基本挙動を表し、その応力を変数 q_1, q_2 により調節して上記の特性を再現する。

まず、全ての定振幅正弦波载荷実験の半波1各ステップで、応力 τ の実験値と、静的要素・粘弾性要素の応力算定値の和 $\tau_s + \tau_{d(ve)}$ との差を求め、半波1での最大値を非線形粘性要素の応力 $\tau_{d(vs)}$ の目標最大値とした。これらと、そのときの等価歪速度の実験値 $\lambda_{d0} \lambda_{d\dot{\gamma}}$ を図15にプロットし、式(9)に基づく $\tau_{d(vs)} = C_d (\lambda_{d0} \lambda_{d\dot{\gamma}})^\alpha$ をそれに概ね合わせた。つまり、初期载荷で $\dot{\gamma}^* = 0.5$ (4.2節)であるため、この式で $\lambda_{d0} = 3.64$ (表3)を用いた結果、 $C_d = 8.8 \times 10^2$ MPa, $\alpha = 0.45$ と評価された。

図15のモデル曲線は、この C_d, α 値を用いた予測値 $\tau_{d(vs)}$ を示している。目標値のばらつきが大きいのは、応力算定値の和 $\tau_s + \tau_{d(ve)}$ の誤差や、再現すべき履歴の複雑さのためと考えられ、従って本モデル化では、予測値 $\tau_{d(vs)}$ の誤差は避けられない。しかし、以下に述べる変数 q_1, q_2 による試行錯誤的な調整や、 $\tau_{d(vs)}$ 値が τ の一部であること(式(1))などから、 τ の再現精度は良好であった。

式(9)の q_1 は、初期载荷時(4.2節)に $q_1 = 1$ とした後、次式で表す。

$$q_1(\leq 1) = \max\left\{0, \frac{|\gamma|_{\max} - 0.2}{1.8}\right\} + \frac{|\gamma|_{\max}}{|\gamma_r|_{\max}} - 1 \quad (12)$$

すなわち q_1 は最大1とし、例えば定振幅正弦波载荷のように静止から半波1で急に最大歪速度に達したとき応力が立ち上がる傾向を再現する。

また、ランダム载荷などで歪が経験歪を超えたとき応力が上昇する傾向の再現のため、歪の絶対値が過去の全回転点での歪の最大絶対値

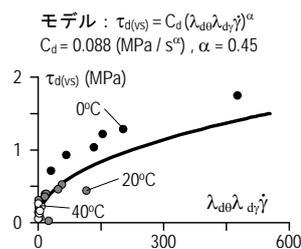


図15 等価歪速度と非線形粘性要素の最大応力の関係

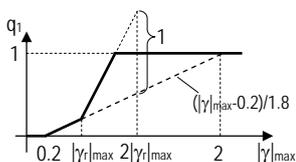


図16 q_1 の変化 ($|\gamma|_{\max} > 0.2$ の場合)

$|\gamma|_{\max}$ を超えて増える場合、経験歪の最大絶対値 $|\gamma|_{\max}$ を更新し続け、 q_1 が最大1となるまで増え続ける(式(12)内の $|\gamma|_{\max}$ 参照)。この増加傾向は、 $|\gamma|_{\max} \geq 0.2$ で $|\gamma|_{\max}$ が大きいほど著しくなるよう設定している(図16)。この後は、除荷時の $|\gamma|_{\max}$ の値が $|\gamma|_{\max}$ の新たな設定値となるため、次の半波の起点では式(12)右辺の括弧外の項の和が0となり、 q_1 が前半波より小、もしくは0として始まり、再び上述の場合になるまで一定であり続ける。

一方、 q_2 は初期载荷時で最大値1とするが、その後は、次式のように減少させ、履歴曲線のくびれを再現する。

$$q_2(\leq 1) = |\gamma / \gamma_1| \quad (13)$$

ここに、 γ_1 は τ_d (式(1)) が符号を変えるときの歪値であり、半波ごとに評価する。例えば、図11の半波3では、図中に示す位置となる。

5. 精度検証

図17~図24に、実験結果(実線)と解析結果(破線)の比較を示す。

単調载荷(図17)においては、静的载荷の場合の精度が良好であるとともに、载荷速度が上がるにつれて応力が上昇する傾向を、速度に依存する動的応力要素(式(7),(9))により忠実に再現できている。

定振幅正弦波载荷(図18, 図19)においては、振幅が増えると軟化する振幅依存性、振動数が増えると硬化する振動数依存性、温度が高いと軟化する温度依存性に対して、シフトファクターを用いて、それら各種依存性を考慮したことにより、各振幅・振動数・温度において、解析は実験を再現できている。また、非線形粘性要素(式(9))に用いた q_1 (式(12))により、载荷開始時の応力上昇は、図15の傾向と同様、実験結果に対し0°Cで最大応力予測値が下回り、20°Cで上回っているが、概ね再現できている。さらに、履歴形状が、歪0付近でくびれる傾向も、係数 q_2 により(式(13))考慮できている。

漸増漸減载荷と漸減漸増载荷(図20, 図21)の両方で、漸増時と漸減時の履歴形状が異なり、漸増時のほうが漸近線勾配 G_2 が大きい傾向を再現し、漸増・漸減の判定法を設けたことで(式(4)~(6))、その履歴形状の変化を再現できている。また、歪が今までの経験歪を上回る場合に応力が急上昇する傾向は、非線形粘性要素の付加量を係数 q_1 で調整したことにより(式(12))、再現できている。

シフト漸増载荷およびシフト漸減载荷(図22, 23)のような、振幅が偏った载荷に対しても、上記の G_2 の制御に $|\tau_d|$ を用いたことにより、解析結果は実験結果を再現できている。また、歪200%で $|\tau_d|$ が小さい値で反転した場合でも、静的応力成分の制限方法(3.2節②, ③)を設けたことにより、解析結果は実験結果を再現できている。

さらに地震応答(図24)のような、ランダムな振幅、速度に対しても、上記の定振幅正弦波载荷、漸増漸減载荷、漸減漸増载荷に見られる傾向を考慮して提案した式(11)の効果もあり、解析結果は実験結果を再現できている。

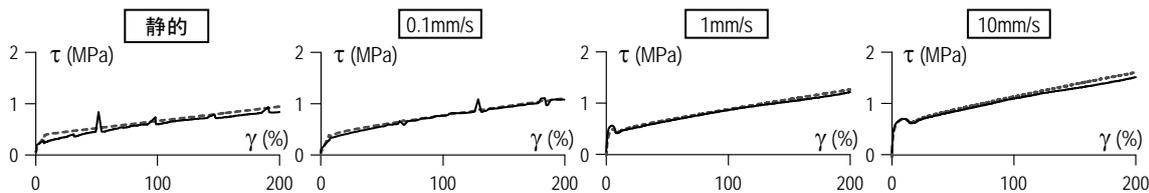


図17 単調载荷(20°C)

— 実験結果, -- 解析結果

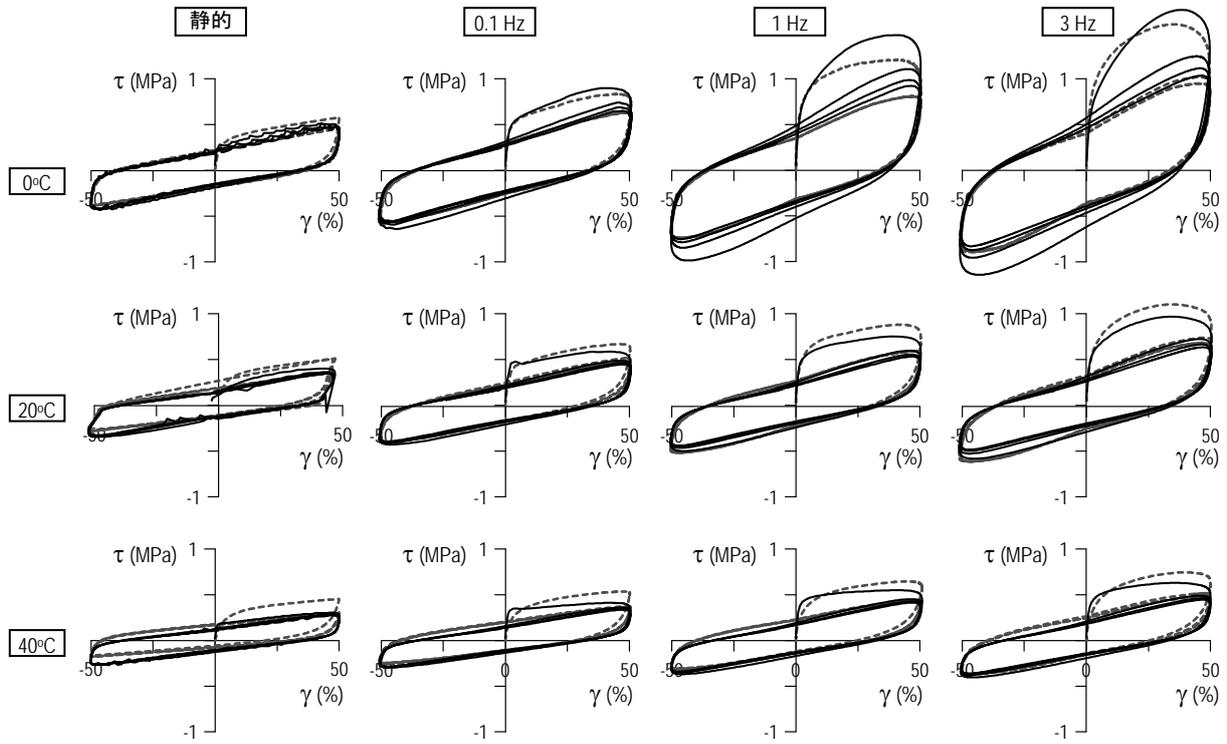


図 18 定振幅正弦波載荷 ($\gamma_{max}=50\%$) 一実験結果, -- 解析結果

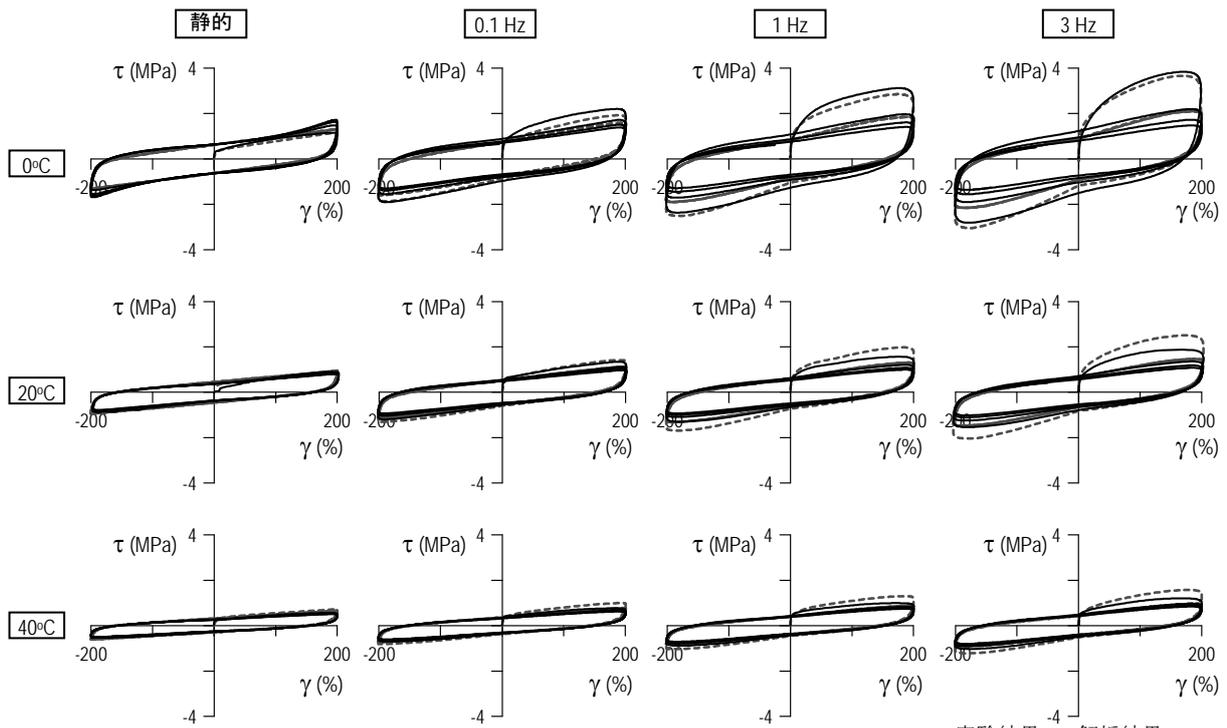


図 19 定振幅正弦波載荷 ($\gamma_{max}=200\%$) 一実験結果, -- 解析結果

6. おわりに

高硬度ゴムダンパーの静的載荷・動的載荷実験を述べ、その結果に基づき、時刻歴解析手法を提案した。結論を以下に述べる。

- (1) 振幅、振動数、温度、そして歪履歴を様々にかえた多数の実験により、本高硬度ゴムは、振幅・振動数・温度に依存することが分かった。また、振動数依存する他の高分子系材料とは対照的に、静的載荷でも履歴が大きな膨らみをもつことも分かった。
- (2) モデルは、歪・温度のみに依存して、静的応力成分を再現する静的

応力要素と、歪・温度・振動数に依存して、動的応力成分を再現する動的応力要素の並列体とした。

- (3) 静的応力要素は、弾塑性曲線履歴型モデルとして表した。「温度・振幅等価性」を発見し、それを組み込むことにより、歪・温度への依存を簡便にモデル化できた。
- (4) 動的応力要素は、粘弾性要素と非線形粘性要素の並列体でモデル化した。「温度・振動数等価性」、「振幅・振動数等価性」を発見し、それらを活用して歪・温度・振動数への依存を簡便にモデル化できた。

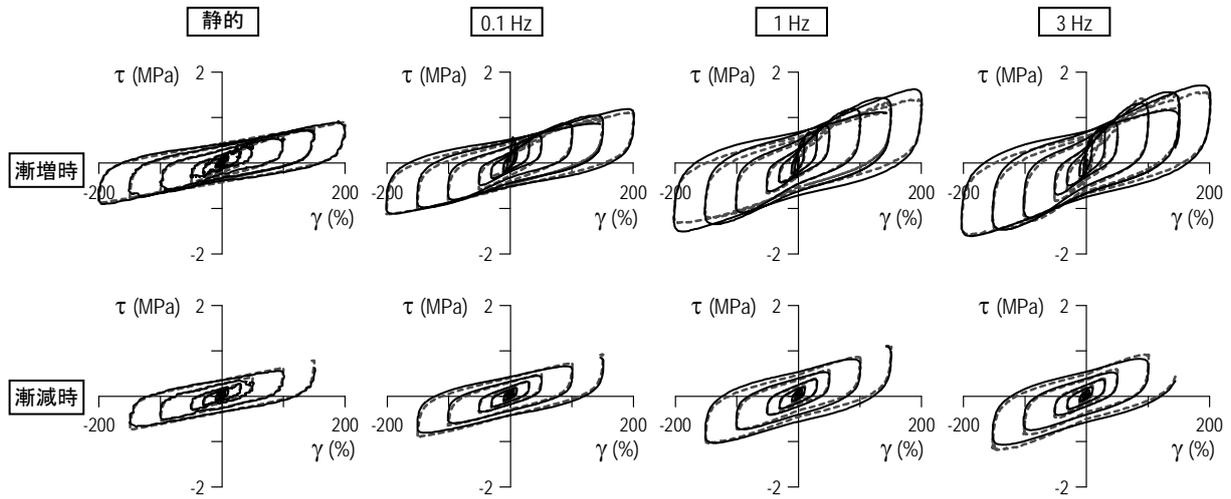


図 20 漸増漸減载荷(20°C)

—実験結果, --解析結果

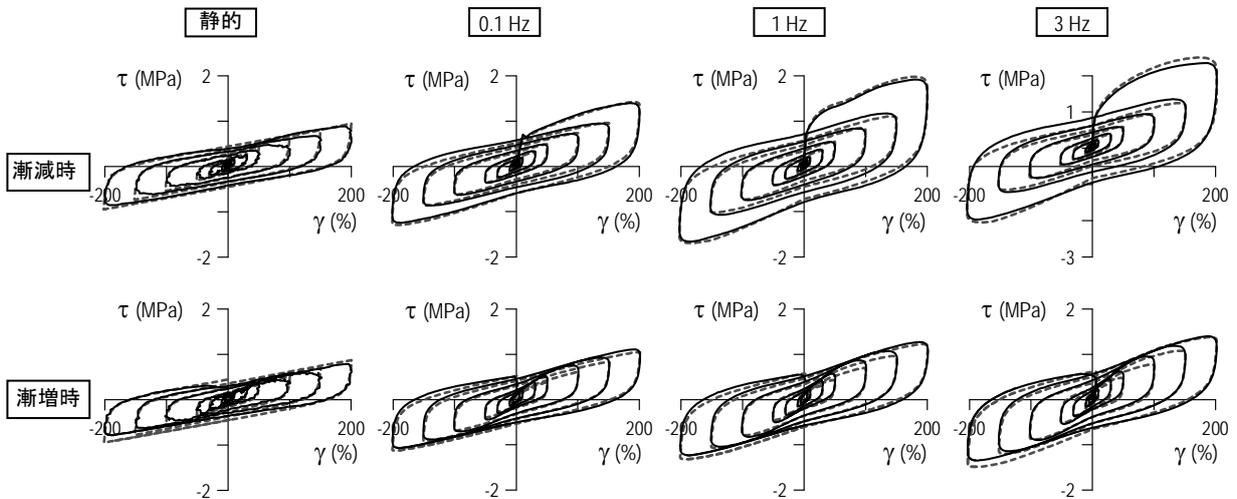


図 21 漸減漸増载荷(20°C)

—実験結果, --解析結果

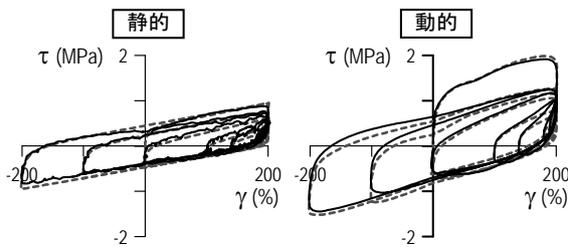


図 22 シフト漸増载荷 (20°C)

—実験結果, --解析結果

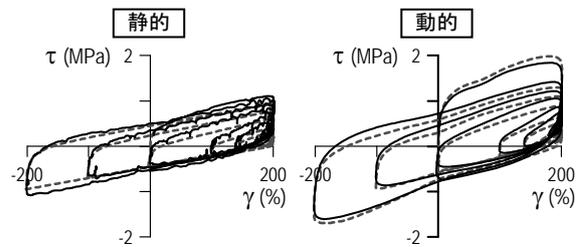


図 23 シフト漸減载荷 (20°C)

(5)上記モデルによる解析結果は、実験結果を高精度で再現した。なお、本解析法の適用範囲は、動的実験との比較を行った振動数 0.1~3 Hz, 温度 0~40°C, せん断歪 200%以下とする。

謝辞：本論文の最終段階において、詳細な検証作業をしていただいた東京工業大学修士学生、村井亮平君に深謝いたします。

参考文献

- 1) Ferry, J.D : Viscoelastic Properties of Polymers: John Wiley & Sons Inc., Third Ed., New York, 1980
- 2) 材料システム：粘弾性特集, 金沢工業大学材料システム研究所, 第 6 巻, 1987
- 3) 笠井和彦, 寺本道彦, 大熊潔, 所健：粘弾性体の温度・振動数・振幅依存を考慮した構成則(その 1 線形領域における温度・振動数依存のモデル化), 日

本建築学会構造系論文集, 第 543 号, pp.77-86, 2001.5

- 4) 笠井和彦, 寺本道彦, 大熊潔, 所健：粘弾性体の温度・振動数・振幅依存を考慮した構成則(その 2 温度上昇および歪・歪速度がもたらす非線形性のモデル化), 日本建築学会構造系論文集, 第 561 号, pp.55-63, 2002.11
- 5) 笠井和彦, 大木洋司, 雨宮健吾, 木村勝彦：イソブチレン・スチレン系のブロック共重合体からなる粘弾性材料の構成則(その 1 小歪領域における温度・振動数依存のモデル化), 日本建築学会構造系論文集, 第 569 号, pp.47-54, 2003.7
- 6) 大木洋司, 笠井和彦, 雨宮健吾, 木村勝彦：イソブチレン・スチレン系のブロック共重合体からなる粘弾性材料の構成則(その 2 大歪領域における温度・振動数・振幅依存のモデル化), 日本建築学会構造系論文集, 第 617 号, pp.77-85, 2007.7
- 7) 笠井和彦, 山崎久雄, 小澤秀允, 金子洋文, 貞末和史, 小野吉信：繰返し応力を受ける鋼材の曲線履歴型モデル(その 7 解析モデルの改良), 日本建築学会大会梗概集, pp.907-908, 2008.9
- 8) 竹中康夫, 山田和彦, 吉川和秀：免震積層ゴム支承の曲線履歴型復元力モデル「修正 HD モデル」, 日本建築学会技術報告集, 第 14 号, pp.87-92, 2001.12

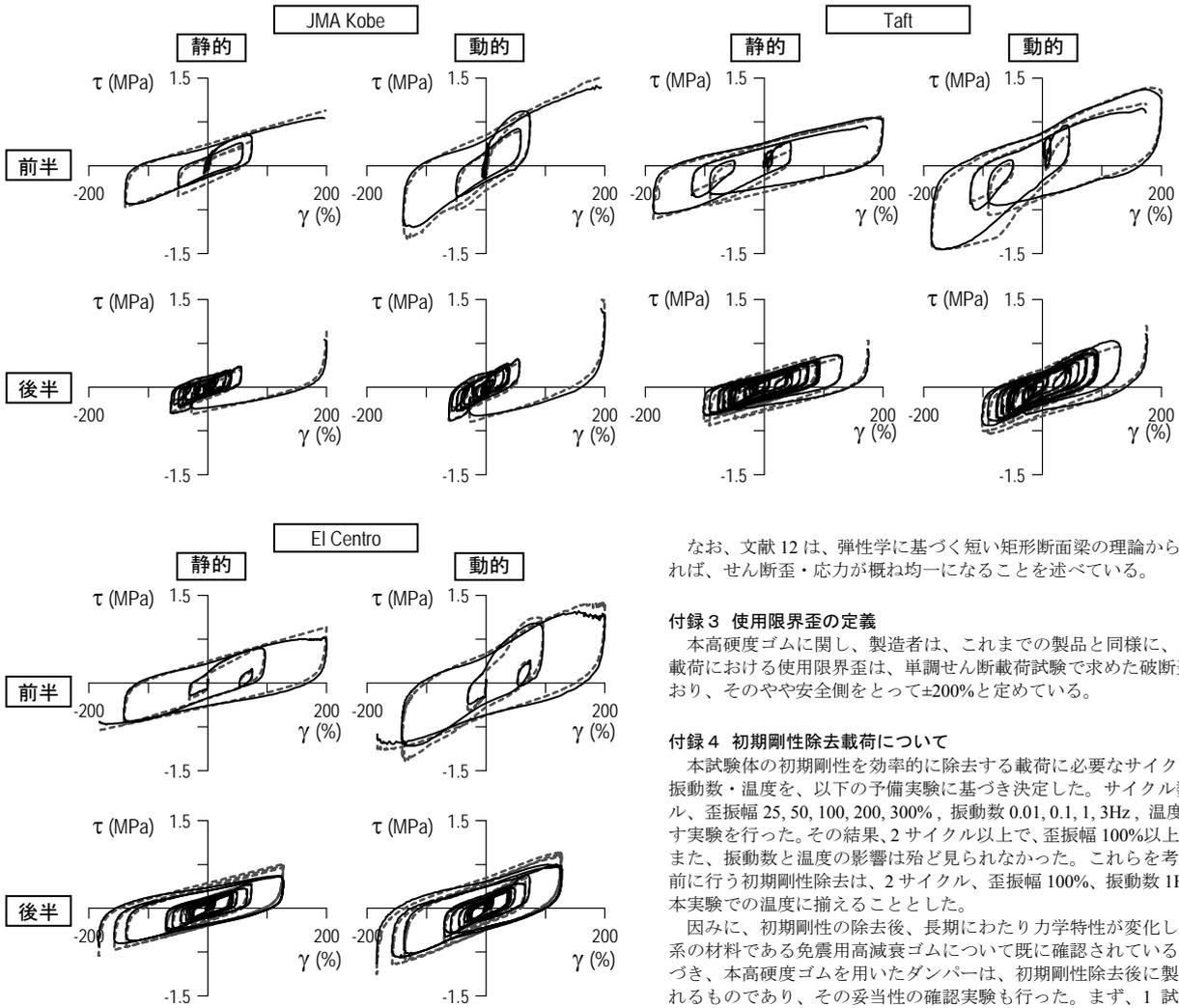


図 24 地震応答載荷 (20°C) — 実験結果, -- 解析結果

- 9) 曾田五月也, 柿本和茂, 関谷英一: 軟化型・硬化型非線形粘弾性ダンパーの力学モデル, 日本建築学会構造系論文集, 第 551 号, pp.45-52, 2002.1
- 10) 来田義弘, 中村豊, 竹脇出, 上谷宏二: 非線形システム同定法による高減衰ゴム材料の開発, 日本建築学会構造系論文集, 第 531 号, pp.63-70, 2008.7
- 11) 谷翼, 辻聖晃, 吉富信太, 竹脇出, 松本達治: 高硬度ゴム粘弾性体の極微小変形から大変形までのひずみ・振動数依存性のモデル化(高硬度ゴム粘弾性体の力学モデルの構築 その 1), 日本建築学会構造系論文集, 第 629 号, pp.1079-1086, 2008.7
- 12) 笠井和彦, 佐藤大樹, 黄一華: 継続時間が長い外乱での温度上昇と熱伝導・伝達を考慮した粘弾性ダンパーの解析手法, 日本建築学会構造系論文集, 第 599 号, pp.61-69, 2006.1

付録 1 温度上昇の影響のモデル化

図 1 に示した熱電対により、全試験体の載荷中における温度上昇を計測した。例えば、初期温度 20°C で、1Hz の定振幅正弦波 4 サイクル(2.1 節)の試験では、歪振幅±50, ±100, ±200%それぞれの場合、温度が 1.5, 3.3, 5.6°C 上昇した。

一方、本高硬度ゴムの温度依存性は、通常の粘弾性材料に比べ抑えられている。例えば 1Hz, 歪振幅±200%の場合、初期温度 20°C に比べ、0, 10, 30, 40°C それぞれで、ゴムの等価剛性が 1.51, 1.14, 0.86, 0.74 倍、等価減衰定数が 1.03, 1.00, 0.98, 0.96 倍である。つまり、使用限界歪±200% (2.1 節)を 4 サイクル与えた後でも等価剛性が 6%程下がるだけであり、設計レベルの強震では、サイクル数がより少ないと考え、載荷中の温度上昇を無視する簡易なモデル化を検討した。

付録 2 ゴム試験片の長さとの厚さの比に関する注釈

本高硬度ゴム試験片 1 枚 (40×40×8mm) の長さとの厚さの比は、やや少な目の 5 であった (2.1 節)。試験機の載荷力により、せん断面積が制限されたためである。一方、同材料を用いる実際のダンパーは 400×400×16mm で、比は 25 となり、せん断変形がより卓越する形状である。この影響の検討のため、後者も試験し、結果を比較した。21°C で、0.1, 0.3, 0.5, 1 Hz, および±50, ±100, ±200, ±300 %歪振幅を用い、例えば図 A1 のように、両試験から得た平均せん断応力 $\tau = F/A$ 、とせん断歪 $\gamma = u/d$ (図 1 参照) の関係がほぼ一致し、よって比が 5 でもせん断変形が卓越すると思われる、本結果の汎用性が示されたと考えられる。

なお、文献 12 は、弾性学に基づく短い矩形断面梁の理論から、比が 4 程度あれば、せん断歪・応力が概ね均一になることを述べている。

付録 3 使用限界歪の定義

本高硬度ゴムに関し、製造者は、これまでの製品と同様に、繰り返しせん断載荷における使用限界歪は、単調せん断載荷試験で求めた破断歪の 1/2 としており、そのやや安全側をとって±200%と定めている。

付録 4 初期剛性除去載荷について

本試験体の初期剛性を効率的に除去する載荷に必要なサイクル数・歪振幅・振動数・温度を、以下の予備実験に基づき決定した。サイクル数 1, 2, 4 サイクル、歪振幅 25, 50, 100, 200, 300%, 振動数 0.01, 0.1, 1, 3Hz, 温度 0, 20, 40°C を試す実験を行った。その結果、2 サイクル以上で、歪振幅 100%以上であればよく、また、振動数と温度の影響は殆ど見られなかった。これらを考慮し、本実験の前に行う初期剛性除去は、2 サイクル、歪振幅 100%、振動数 1Hz とし、温度は本実験での温度に揃えることとした。

因みに、初期剛性の除去後、長期にわたり力学特性が変化しないことは、同系の材料である免震用高減衰ゴムについて既に確認されている。この経験に基づき、本高硬度ゴムを用いたダンパーは、初期剛性除去後に製品として出荷されるものであり、その妥当性の確認実験も行った。まず、1 試験体について、初期剛性除去時(1 日目)、2, 6, 12, 30, 100 日目の載荷の履歴曲線を比較した (図 A2 参照)。また、同じ材料の 4 試験体を 1 日目に載荷した後、それぞれ 6 日目のみ載荷、12 日目のみ載荷、30 日目のみ載荷、100 日目のみ載荷し、これら全ての履歴曲線を比べ、初期剛性除去後の経時変化が無いことも確認した。

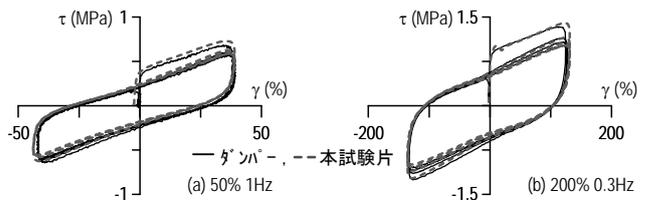


図 A1 長さとの厚さの比が著しく異なる本試験片とダンパーの履歴曲線の比較

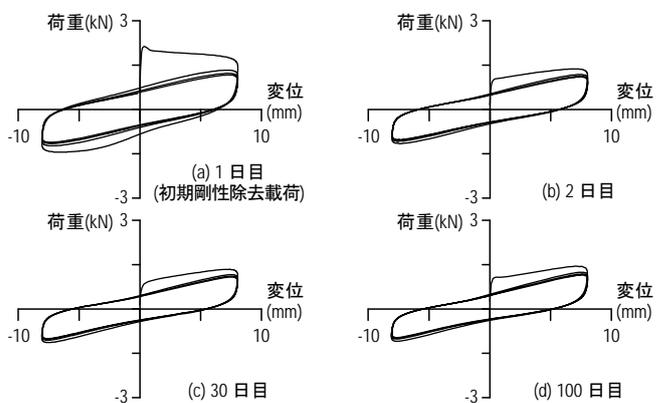


図 A2 初期剛性除去(1 日目)から 100 日目までの履歴曲線の変化