

高ひずみ/高面圧下における ゴム製緩衝装置の応力度—ひずみ関係

Stress-Strain Hysteresis of a Rubber Type Shock Absorbing Device under Extremely Large Compressions

庄司学¹, 川島一彦², 宇根寛³, 剣持安伸³, 長谷川恵一⁴, 島ノ江哲⁵

Gaku Shoji, Kazuhiko Kawashima, Hiroshi Une, Yasunobu Kenmotsu,
Keiichi Hasegawa and Satoshi Shimanoe

- 1 修(工) 東京工業大学助手 工学部土木工学科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)
- 2 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (同上)
- 3 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (同上)
- 4 工修 横浜ゴム株式会社 MB 技術開発本部 (〒254-0047 神奈川県平塚市追分 2-1)
- 5 工修 横浜ゴム株式会社 MB 生産本部 (〒254-0047 神奈川県平塚市追分 2-1)

This paper describes a series of one-dimensional compressive tests to clarify the stress-strain relation of a rubber type shock absorbing device for the mitigation of pounding effect between adjacent decks. The behavior of the device under extremely large compressions more than 70% strain level which results in more than 50MPa stress level is examined. The hysteretic energy dissipation for natural rubber and high damping rubber shock absorbers is compared. A classically analysis based on the kinetic theory of rubber-like elasticity is presented in comparison with the measured Young's modulus. The effect of the loading/unloading frequency on dynamic modulus and loss modulus is also studied.

Key Words : Bridge, Seismic Design, Seismic Retrofit, Pounding, Shock Absorbing Device, Stress-Strain Hysteresis

1. はじめに

免震支承や積層ゴム支承のゴム系支承で支持された長周期の橋梁が兵庫県南部地震クラスの地震動を受けると、桁の応答変位が増大するために、隣接桁間の掛け違い部や桁—橋台間で衝突が生じる可能性がある。このため、衝突の影響を緩和するための緩衝装置の開発が現在、急務となっている。

桁間衝突が生じた場合の衝突力を数値解析的に求めると、桁重量に相当する衝突力が生じることがある¹⁾。このような大きな衝突力を緩衝装置で圧縮力として受け止めると、緩衝装置には70%以上のひずみが生じ、50MPa以上の高面圧が作用することになる²⁾。ゴム系支承の設計では一般に面圧は8MPa程度に抑えられることが多いが³⁾、緩衝装置にはそれをはるかに上回る面圧が作用することが予想される。このため、緩衝装置の応力度—ひずみ関係は高ひずみ/高面圧下においても安定していることが求められ、このような条件を満足する装置としてゴム材の圧縮変形を利用した緩衝装置が有望である。

ゴム弾性体の圧縮特性に関する実験的・理論的研究としては、Forster⁴⁾、Payne⁵⁾、Gentら⁶⁾が一軸圧縮荷重実験により荷重—変位曲線を求め、ゴム状弾性統計理論⁷⁾から求められる理論値との比較を行い、形状係数との関

係について考察している。Beatty⁸⁾は、直方体、円柱、中空円筒のゴム材に対して圧縮荷重実験を行い、座屈などの弾性安定について検討している。

土木・建築の分野では免震設計の普及に伴い、ゴム材は注目を集めてきており⁹⁾、Moriら¹⁰⁾は免震支承の圧縮剛性や圧縮力を受けた場合の応力分布について検討している。地震応答の低減を目的として、橋梁の桁端部あるいは支承周辺部にゴム材を活用するという観点からは、窪田ら¹¹⁾が天然ゴム、合成樹脂、発泡スチロールを落橋防止装置に取り付けた場合の緩衝効果を衝突実験より明らかにし、川島ら¹²⁾はゴム製緩衝装置の大変形時の衝突緩衝力やエネルギー吸収性能について同様に衝突実験より検討している。また、伊津野ら¹³⁾はゴム材の圧縮変形を利用し、変位ストッパーとしての機能を持たせた反力分散装置の開発を試みており、園田ら¹⁴⁾は積層繊維ゴムを巻いた緩衝ピンを落橋防止連結板に適用した場合の緩衝効果について実験的に考察している。

これらの結果はいずれも、緩衝装置に生じるひずみが30~40%程度で、面圧は50MPa以下の領域を扱っており、それ以上の高ひずみ/高面圧がゴム製緩衝装置に作用した場合の実験的・理論的検討は少ない。以上を踏まえて、本研究では、70%以上の高ひずみ、50MPa以上の高面圧下におけるゴム製緩衝装置の応力度—ひずみ関係を

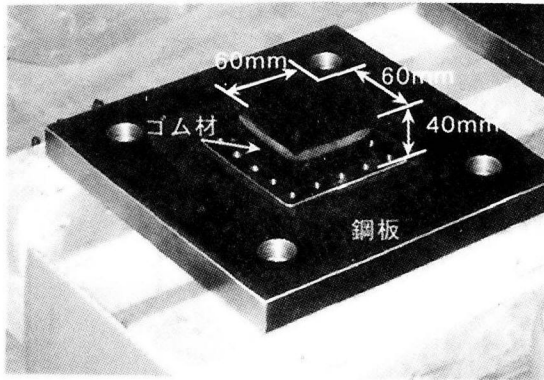


写真-1 ゴム製緩衝装置

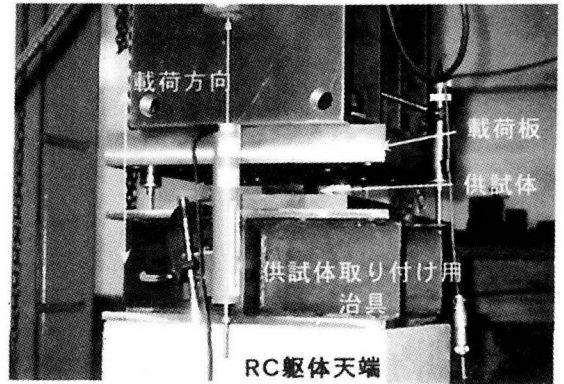


写真-2 載荷状況

表-1 各供試体の静的せん断弾性係数, 引張強さ, 伸び, 硬さ

	NR-G6	NR-G12	HDR-G6	HDR-G12
静的せん断弾性係数 (MPa)	6	12	6	12
引張強さ (MPa)	24.9	30.7	12.5	20
伸び (%)	727	590	693	610
硬さ (度)	45	65	74	82

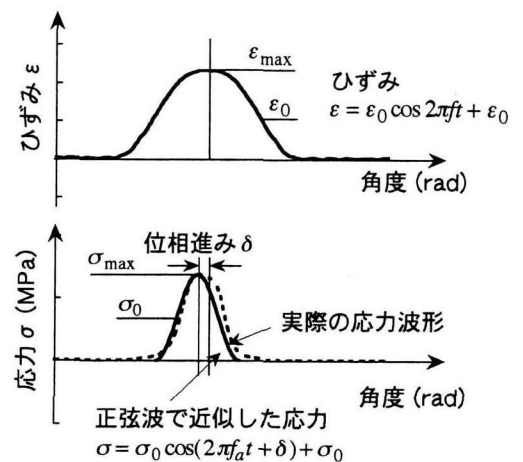


図-1 ひずみ ε と応力 σ

一軸圧縮載荷実験により明らかにし、緩衝材として天然ゴムと高減衰ゴムを用いた場合の相違、および静的せん断弾性係数 G や載荷/除荷周波数 f の影響について検討することとした。

2. 実験供試体および実験方法

写真-1 には対象とした実験供試体を示す。ゴム材の下面には、緩衝装置を桁端部に取り付けるために、厚さ 25mm の鋼板が加流接着されている。ゴム材の上面は相手側の桁と直接接触するが、本実験ではこれを載荷装置の載荷板との接触という形でモデル化している。したがって、緩衝装置の境界条件は下面が完全拘束（固定）、上面は載荷装置の載荷板による摩擦拘束を受ける自由となる。

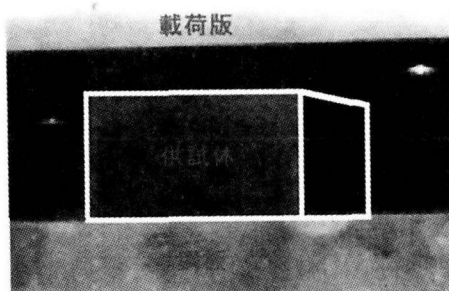
ゴム材としては天然ゴムと高減衰ゴム（以下、NR、HDR と表記）を対象とし、ともに静的せん断弾性係数 G は 0.6MPa と 1.2MPa（以下、G6、G12 と表記）の 2 通りとした。供試体の基本物性である引張強さ、伸び、硬さを表-1 に示す。供試体の受圧面は一辺の長さ a が 60mm の

正方形で、高さ h は 40mm である。よって、本供試体の形状係数 S は 0.375 となる。ここで、形状係数 S は受圧面積（初期断面積） A_0 を側面積 A_s （自由表面）で除して次式より定義される。

$$S = \frac{A_0}{A_s} = \frac{a^2}{4ah} = \frac{a}{4h} \quad (1)$$

載荷状況を写真-2 に示す。鉄筋コンクリート躯体の上面に治具を設置し、それに供試体下面の鋼板を取り付けた。載荷/除荷は正弦波を変位制御で与え、載荷装置の載荷板と供試体の上面が傾かないように一軸圧縮状態で行った。

図-1 は、本実験で与えるひずみ ε と応力 σ の波形を 1 サイクルの載荷/除荷に対して示したものである。なお、実際には後述するように、応力 σ の時刻歴は正弦波とはならない。これは、ひずみ ε を正弦波で与えてもゴム材がハードニングすると、応力 σ はきれいな正弦波とはならないためである。ここでは、前述したように応力 σ が 50MPa 以上となるハードニング領域を対象とするため、図-1 のように応力 σ をひずみ ε の周波数 f よりも高い周波数 f_a の正弦波で次式のように近似することとした。



(a) 載荷前



(b) ひずみ70%の場合

写真-3 圧縮変形の様子 (NR-G12 の場合)

表-2 載荷/除荷周波数 f , 載荷/除荷最大変位振幅 x_0 , 繰り返し回数, 載荷/除荷最大速度 v

載荷/除荷周波数 (Hz)		載荷/除荷最大変位振幅 (mm) 繰り返し回数				載荷/除荷最大速度 (mm/s)							
載荷	除荷	振幅1	振幅2	振幅3	振幅4	振幅1		振幅2		振幅3		振幅4	
						載荷	除荷	載荷	除荷	載荷	除荷	載荷	除荷
0.5	0.5	10mm3回	12mm3回	14mm3回	15mm3回	31.4	31.4	37.7	37.7	44	44	47.1	47.1
0.005	0.005	10mm3回	12mm3回	14mm3回	15mm3回	0.31	0.31	0.38	0.38	0.44	0.44	0.47	0.47

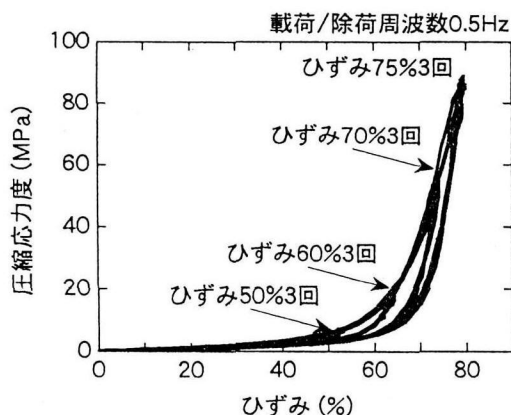


図-2 NR-G12の応力度—ひずみ関係

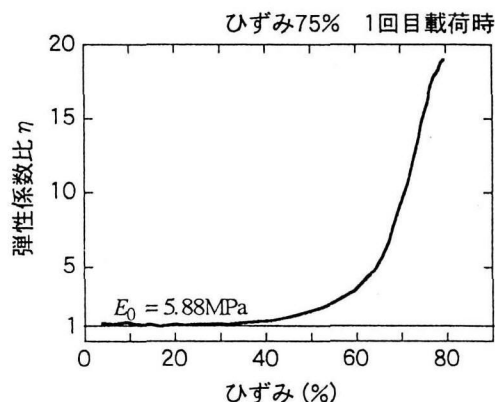


図-3 NR-G12の弾性係数比 η

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cos 2\pi f t + \varepsilon_0 = \frac{x}{h} \quad (2)$$

$$\sigma = \sigma_0 \cos(2\pi f_a t + \delta) + \sigma_0 = \frac{F}{A_0} \quad (3)$$

ここで, f : 載荷/除荷周波数, すなわちひずみの周波数, f_a : 応力の周波数 ($f_a > f$), δ : ひずみ ε に対する応力 σ の位相進み, ε_0 : ひずみ振幅, x : 圧縮変位, σ_0 : 応力振幅, F : 圧縮荷重である。ここでは, ひずみ振幅 ε_0 と応力振幅 σ_0 は次式より求められる。

$$\varepsilon_0 = \frac{\varepsilon_{\max}}{2}; \sigma_0 = \frac{\sigma_{\max}}{2} \quad (4)$$

ここで, $\varepsilon_{\max}$: ひずみの最大振幅, $\sigma_{\max}$: 応力の最大振幅である。図-1 に示すように, 実在の物質ではひずみ ε を与えると応力 σ は常に δ だけ位相が進む。

表-2 には載荷/除荷周波数 f , 載荷/除荷時の最大変位振幅 x_0 , 各振幅における繰り返し回数, 載荷/除荷最大速度 v を示す。載荷/除荷周波数 f は 0.005Hz と 0.5Hz の 2 通りとし, 最大変位振幅 x_0 は式(4)のひずみの最大振幅 $\varepsilon_{\max}$ が 50%, 60%, 70%, 75% となるように, 式(2)より設定した。載荷/除荷周波数 f を 100 倍に変化させて

いるため, 式(5)より載荷/除荷最大速度 v を求めるとそのオーダーは $O(10^{-1} \text{ mm/sec})$ から $O(10^1 \text{ mm/sec})$ まで 100 倍変化する。

$$v = 2\pi f \cdot x_0 \quad (5)$$

載荷/除荷の繰り返し回数はいずれの載荷振幅に対しても 3 回とした。なお, 実験時の実験棟の室温は 13℃ ~ 21℃ と常温であった。

3. 緩衝材物性の影響

3.1 NR と HDR の相違

載荷/除荷周波数 f を 0.5Hz にした場合の NR-G12 供試体の応力度—ひずみ関係を図-2 に示す。従来のゴム系支承で考慮されている 8~12MPa の 5 倍以上の面圧が作用し, 70%以上のひずみが生じているが緩衝装置の応力度—ひずみ曲線は安定している。写真-3 は処女載荷前とひずみが 70%付近の緩衝装置の様子を示したものである。圧縮変形が進むと緩衝装置の側面が面外に大きくはみ出すが, 除荷後にはほぼもとの状態に戻っており, 外的

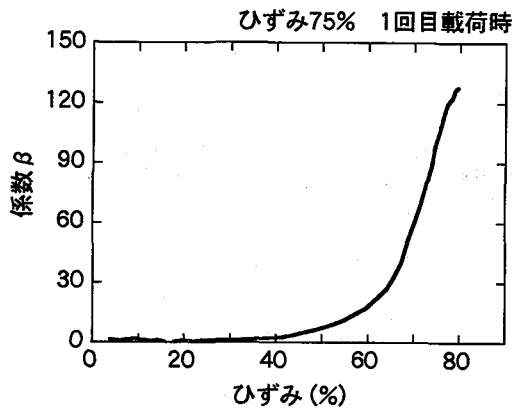


図-4 係数 β とひずみの関係 (NR-G12の場合)

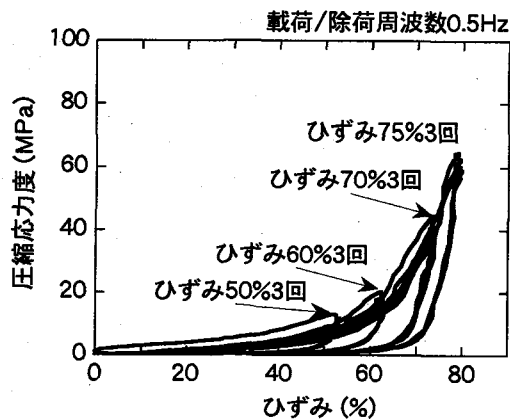


図-5 HDR-G12の応力度—ひずみ関係

損傷も見られない。供試体の処女载荷前の高さは4辺において38.8mm, 38.5mm, 38.65mm, 38.5mmであるのに対して、载荷後には37mm, 37.2mm, 37.7mm, 37.25mmとなり、わずかに2.5~4.6%高さが低くなるだけである。

緩衝装置の割線弾性係数 E はひずみ依存性を示すため、これを初期弾性係数 E_0 (=5.88MPa)で除して、弾性係数比 η を次式により定義する。

$$\eta = \frac{E}{E_0} \quad (6)$$

図-3は弾性係数比 η —ひずみ ϵ の関係を示した結果である。この結果はひずみが75%に達した場合の1回目の载荷から求めたものである。これより、ひずみが40%を越えると弾性係数比 η が大きくなり始め、ひずみが75%付近では割線弾性係数 E は初期弾性係数 E_0 の20倍近くに達することがわかる。ひずみが40%以下の領域におけるゴム弾性体の弾性係数 E は、初期弾性係数 E_0 と形状係数 S を用いて次式により与えられる⁶⁾。

$$E = E_0(1 + \beta \cdot S^2) \quad (7)$$

ここで、 β は形状に依存する係数で、直方体や円柱の場合には1~2の値をとる。式(7)は係数 β について次式のように書き換えられる。

$$\beta = \frac{1}{S^2} \left(\frac{E}{E_0} - 1 \right) = \frac{1}{S^2} (\eta - 1) \quad (8)$$

いま、形状係数 S は前述したように $S = 0.375$ であり、

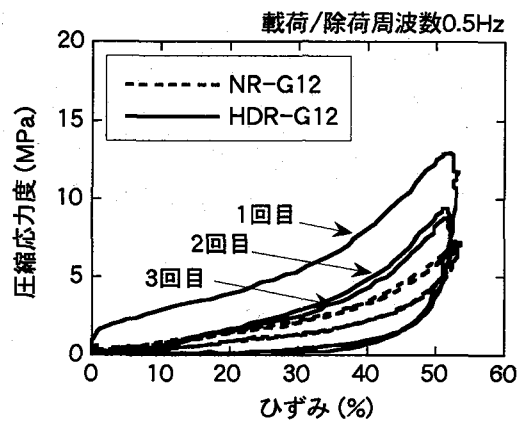


図-6 NR-G12とHDR-G12の応力度—ひずみ関係の比較 (ひずみ50%の場合)

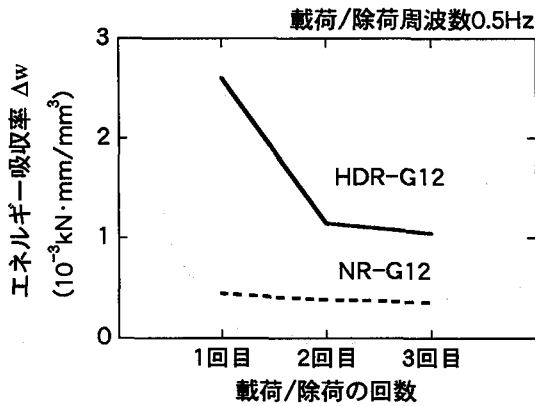
図-3に示した弾性係数比 η を式(8)に代入し、係数 β を求め、ひずみ ϵ との関係を示すと図-4のようになる。図-3と似た特性を示すが、ひずみが40%を越えると係数 β は1~2の範囲を越え、ひずみが75%付近では120程度まで大きくなる。図-3および図-4の結果より、ひずみが40%程度まではゴム製緩衝装置の応力度—ひずみ関係は古典的な弾性論で説明できるが、40%を越える高ひずみ領域においてはこれでは説明しきれない。

図-5には、载荷/除荷周波数 f を0.5Hzにした場合のHDR-G12供試体の応力度—ひずみ関係を示す。図-6は、ひずみが50%の場合の応力度—ひずみ関係をNR-G12供試体とHDR-G12供試体と比較した結果である。NR-G12の場合には3回の繰返し回数による応力度の低下はわずかであり、応力度—ひずみ関係は载荷/除荷の繰返し回数、すなわち履歴経験にほとんど依存しない。一方、HDR-G12の応力度—ひずみ関係は履歴経験に大きく依存し、処女载荷に比較して2回目、3回目の载荷では応力度が43~67%低下する。

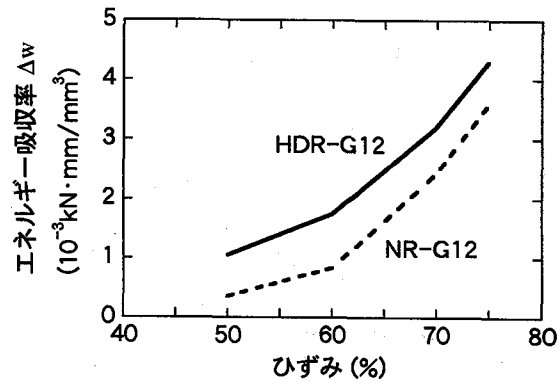
ここで、各载荷/除荷過程における単位体積当たりのエネルギー吸収率 Δw は緩衝装置の体積を V とすれば、次式より求められる。

$$\Delta w = \frac{1}{V} \int F \cdot dx \quad (9)$$

図-7は、NR-G12供試体とHDR-G12供試体のエネルギー吸収率 Δw を比較した結果である。ひずみが50%の場合には、载荷/除荷の繰返し回数が進むにつれてHDR-G12のエネルギー吸収率 Δw は低下する。しかし、HDR-G12は3回目のくり返しにおいてもNR-G12に比較すればその3倍程度大きなエネルギー吸収率 Δw を有する。一方、NR-G12のエネルギー吸収率 Δw は、ひずみが50%の場合にはHDR-G12の1/3程度であるが、ひずみが75%に達するとHDR-G12の8割程度まで大きくなる。しかし、いずれにせよHDR-G12のほうが大変形時のエネルギー吸収性能は高い。



(a) ひずみ50%の場合



(b) ひずみとの関係 (3回目の載荷/除荷)

図-7 エネルギー吸収率 Δw の比較

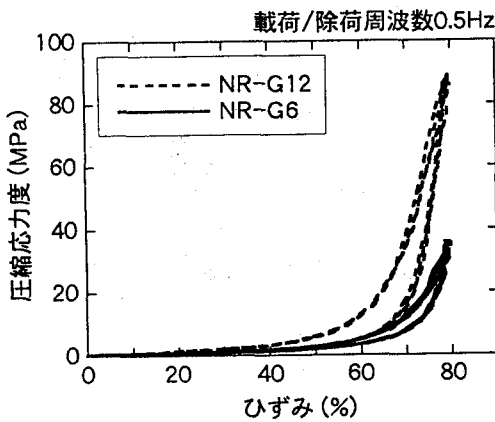


図-8 NR-G12とNR-G6の応力度—ひずみ関係の比較 (ひずみ75%の場合)

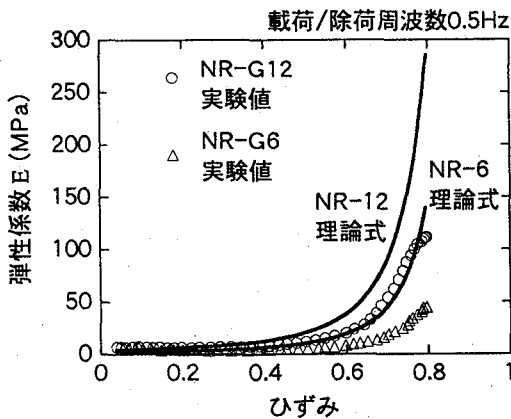


図-10 弾性係数 E の実験値と式(14)による理論式の比較 (ひずみ75%の場合)

3.2 静的せん断弾性係数 G の影響

NR-G12 供試体と NR-G6 供試体の応力度—ひずみ関係をひずみが 75%の場合について比較した結果が図-8 である。せん断弾性係数 G が $1/2$ になると、応力度は $1/2$ 以下に低下することがわかる。

ここで、図-9 に示すような回転を伴わない一様ひずみを受ける緩衝装置の自由エネルギー W はゴム状弾性統計理論によると⁷⁾、せん断弾性係数 G と伸長比

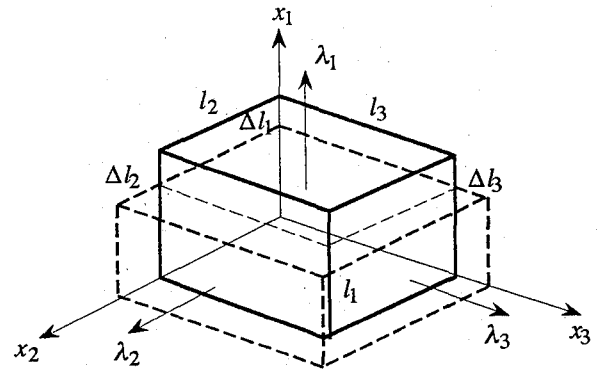


図-9 回転を伴わない一様な変形状態

λ_i ($i=1,2,3$) を用いて次式により求められる。

$$W = \frac{1}{2} G (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \quad (10)$$

ここに、伸長比 λ_i は、変形前の緩衝装置の各辺の長さ l_{i0} を変形後の長さ l_i で除して、次式によって定義される。

$$\lambda_i = \frac{l_i}{l_{i0}} \quad (i=1,2,3) \quad (11)$$

いま、非圧縮性 ($\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 = 1$) を仮定し、 x_1 方向の一軸変形のみ ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$) と仮定すると、式(10)は次式のように書き換えられる。

$$W = \frac{1}{2} G (\lambda_1^2 + \frac{2}{\lambda_1} - 3) \quad (12)$$

したがって、初期断面積 A_0 に対する応力度 σ_1 は

$$\sigma_1 = \frac{\partial W}{\partial \lambda_1} = G (\lambda_1 - \frac{1}{\lambda_1^2}) \quad (13)$$

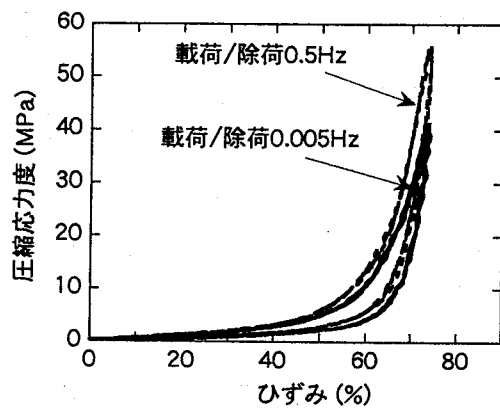
で与えられ、弾性係数 E は式(13)を伸長比 λ_1 で微分して

$$E(\lambda_1) = G \cdot (1 + \frac{2}{\lambda_1^3}) \quad (14)$$

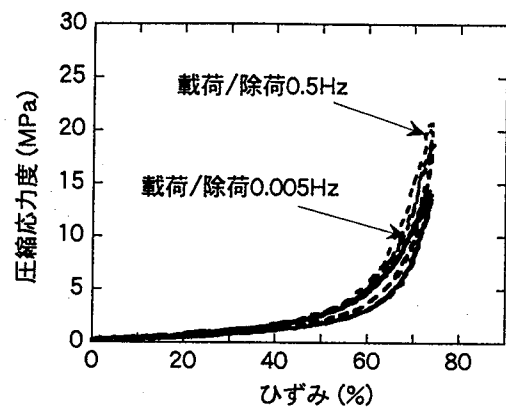
となる。ここでは、伸長比 λ_1 (引張を正) とひずみ ε (圧縮を正) の関係を

$$\lambda_1 = 1 - \varepsilon \quad (15)$$

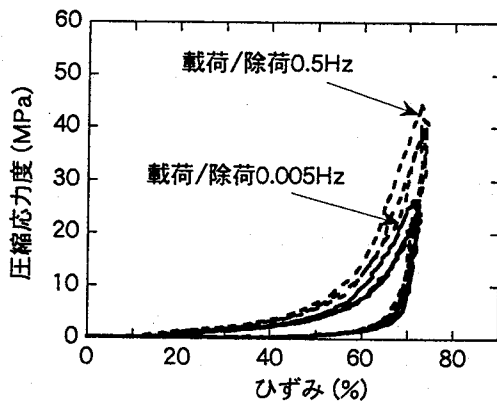
で与え、式(15)を式(14)に代入すれば、弾性係数 E をひずみ ε の関数として表すことができる。なお、式(14)は供試体の上下面 (x_1 方向に直交する面) をともに自由とした場合の解を与えている。実際には、供試体の下面は鋼板



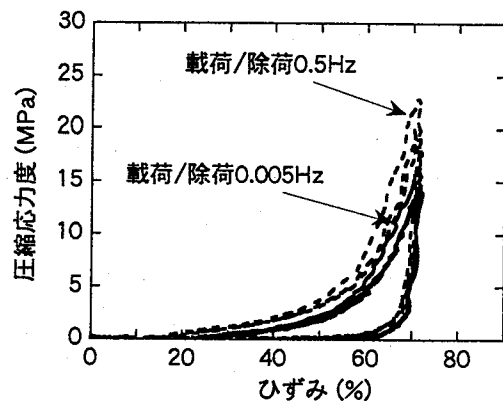
(a) NR-G12の場合



(b) NR-G6の場合



(c) HDR-G12の場合



(d) HDR-G6の場合

図-11 載荷/除荷周波数 f の影響

で拘束され、上面は載荷板で摩擦拘束されていることから、式(14)は本実験における境界条件とは一致していない。

図-10は、NR-G12 供試体と NR-G6 供試体に対して弾性係数 E の実験値と式(14)による理論値を比較した結果である。ここで、実験値としてはひずみが75%に達した場合の1回目の載荷結果を示している。ひずみが30%前後を境にそれより小さいひずみ領域では、理論値が実験値の89~116%となり、実験値の特徴をよく表しているが、ひずみが30%以上の領域では理論値は実験値の最大256%にも達し、実験値を過大に評価する。これは、供試体の下面が拘束されている状態で、ひずみが大きくなると、ゴム材の側面部が膨出し、下面の鋼板に接するようになり、この部分が分担する荷重が有効に供試体に作用しなくなる結果、同一ひずみにおける供試体の応力が小さくなるためである。さらに、参考文献7に示されているように、大ひずみ領域では、1) 式(10)の自由エネルギー W を導出する際の実験値の仮定が成立しないこと、2) ゴム分子間の架橋距離の仮定(ガウス分布)が成立しないこと、3) ゴム分子の配向や結晶化が進むこと、などが理由として考えられる。高ひずみ/高面圧下におけるゴム製緩衝装置の応力度-ひずみ関係のモデル化が次の課題である。

4. 載荷/除荷周波数 f の影響

NR 供試体と HDR 供試体に対して、載荷/除荷周波数 f を0.005Hzから0.5Hzに変化させた場合の応力度-ひずみ関係を比較すると図-11のようになる。載荷/除荷周波数 f が100倍高くなると、同一ひずみにおける応力度はNR-G12の場合には34%程度、NR-G6の場合には37%程度大きくなる。NRに比較するとHDRは載荷/除荷周波数 f の影響を受けやすく、載荷/除荷周波数 f が0.005Hzから0.5Hzに高くなると、同一ひずみにおける応力度はHDR-G12では71%程度、HDR-G6では40%程度大きくなる。これは、載荷/除荷周波数 f が高くなるに従って、ゴム分子間の内部摩擦、すなわち粘性が寄与してくるためである。

いま、式(2)、(3)において $\hat{\varepsilon} = \varepsilon - \varepsilon_0$ 、 $\hat{\sigma} = \sigma - \sigma_0$ と置き換えると、式(2)、(3)は以下のようにになる。

$$\hat{\varepsilon} = \varepsilon_0 \cos 2\pi f t \quad (16)$$

$$\hat{\sigma} = \sigma_0 \cos(2\pi f_a t + \delta) \quad (17)$$

$\omega = 2\pi f$ 、 $\omega_a = 2\pi f_a$ とおくと式(17)は

$$\hat{\sigma} = \sigma_0 (\cos \delta \cdot \cos \omega_a t - \sin \delta \cdot \sin \omega_a t) \quad (18)$$

一般には、 $f_a = f$ と仮定し、応力 $\hat{\sigma}$ を $|\hat{\sigma}|$ で除することにより、動的弾性率 E_d と損失弾性率 E_v は以下のように

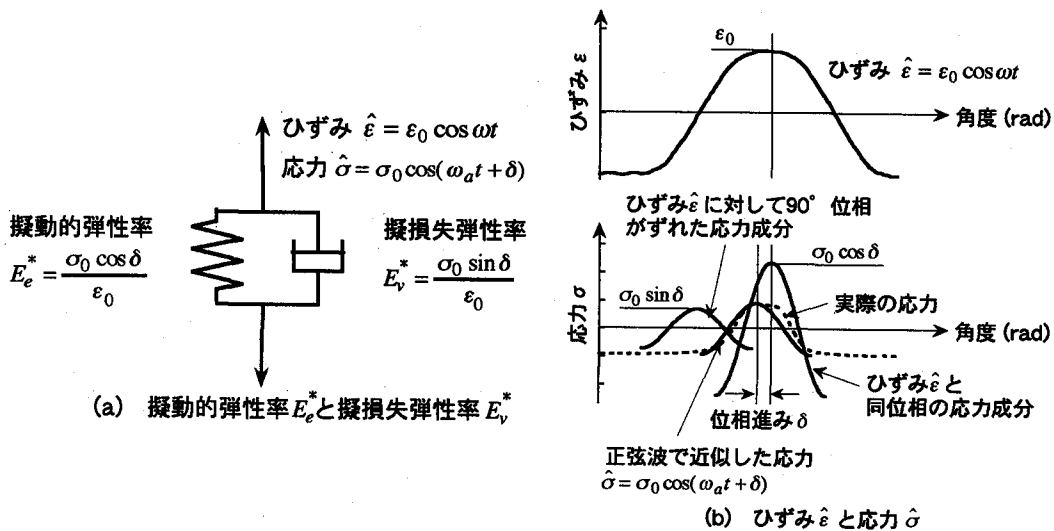


図-12 擬動的弾性率 E_e^* と擬損失弾性率 E_v^* の考え方

定義される¹⁵⁾。

$$\frac{\hat{\sigma}}{\hat{\epsilon}} = E_e \cos \omega t - E_v \sin \omega t \quad (19)$$

ここで、

$$E_e = \frac{\sigma_0 \cos \delta}{\epsilon_0} \quad (20)$$

$$E_v = \frac{\sigma_0 \sin \delta}{\epsilon_0} \quad (21)$$

式(19)の右辺第1項、第2項はそれぞれひずみ $\hat{\epsilon}$ と同位相、90°位相がずれており、このため、動的弾性率 E_e と損失弾性率 E_v はそれぞればね、粘性機構を表している。別な見方をすれば、図-12(a)に示すようにゴム弾性体の力学的特性をばねとダッシュポットが並列に組み合わせさせた Voigt モデルでモデル化したことに相当する。

さらに、変形に伴い、熱として散逸されるエネルギーの尺度として、損失係数 l は以下のように定義されるのが普通である。

$$l = \tan \delta = \frac{E_v}{E_e} \quad (22)$$

しかし、前述したように本実験ではゴム材のハードニングが極めて大きい応力レベルを対象としているため、式(17)において $f_a = f$ と仮定することには問題があるため、式(20)、式(21)のように動的弾性率 E_e と損失弾性率 E_v を定義することはできない。しかし、図-1に示すように実験より得られる応力をひずみの周波数 f よりも高い周波数 f_a の正弦波で近似すれば、ハードニングが大きくなり、応力が最大となる近傍においては、実験より得られる応力をよく近似できる。このため、ここではひずみ $\hat{\epsilon}$ の周波数は f であるが応力 $\hat{\sigma}$ の周波数は f_a であるという条件で、式(16)と式(18)から $\hat{\sigma}/\hat{\epsilon}$ を求めると、

$$\frac{\hat{\sigma}}{\hat{\epsilon}} = E_e^* \cos \omega_a t - E_v^* \sin \omega_a t \quad (23)$$

ここで、

$$E_e^* = E_e \quad (24)$$

$$E_v^* = E_v \quad (25)$$

周波数が異なるため、 $\hat{\sigma}$ と $\hat{\epsilon}$ とは対応しないが、図-12(b)に示すようにある特定の1サイクルの载荷だけを考えれば、 $\hat{\sigma}/\hat{\epsilon}$ を定義することができる。この仮定の下では、式(20)、式(21)から応力振幅 σ_0 、ひずみ振幅 ϵ_0 、位相進み δ を直接実験結果から求めれば、式(24)、式(25)の E_e^* 、 E_v^* を求めることができる。 E_e^* 、 E_v^* は形の上で式(20)、式(21)と同じであるが、応力 $\hat{\sigma}$ の周波数 f_a を用いてある特定の1サイクルに対して式(23)を定義したため、 E_e 、 E_v と区別する目的で、ここではそれぞれ擬動的弾性率 E_e^* と擬損失弾性率 E_v^* と呼ぶこととした。同様に擬損失係数 l^* を次式で定義する。

$$l^* = \frac{E_v^*}{E_e^*} \quad (26)$$

図-13は、NR-G12 供試体を0.005Hzと0.5Hzで载荷/除荷した場合のひずみ ϵ と応力 σ の時刻歴を示した結果である。0.5Hzで加振した場合のほうが0.005Hzで加振した場合よりもひずみ ϵ に対する応力 σ の位相進み δ は大きくなる。図には示していないが、このことはNR-G6、HDR-G12、HDR-G6に対しても同様である。ただし、NR-G12でひずみが60%の場合だけでは、これとは反対の傾向になる。これについては計測上の問題があった可能性があるため、これ以降の段落には使用しない。

図-13に示したひずみ ϵ と応力 σ の時刻歴から、式(20)、式(21)、式(24)、式(25)よりNR供試体の擬動的弾性率 E_e^* 、擬損失弾性率 E_v^* 、擬損失係数 l^* を求めると図-14および表-3のようになる。0.005Hz、0.5Hzのいずれで加振しても擬動的弾性率 E_e^* のほうが擬損失弾性率 E_v^* よりも大きい。これは、NRの力学的特性としては、ばねによる機構のほうが粘性による機構よりも卓越することを示している。

その上で、加振周波数を0.005Hzから0.5Hzに高める

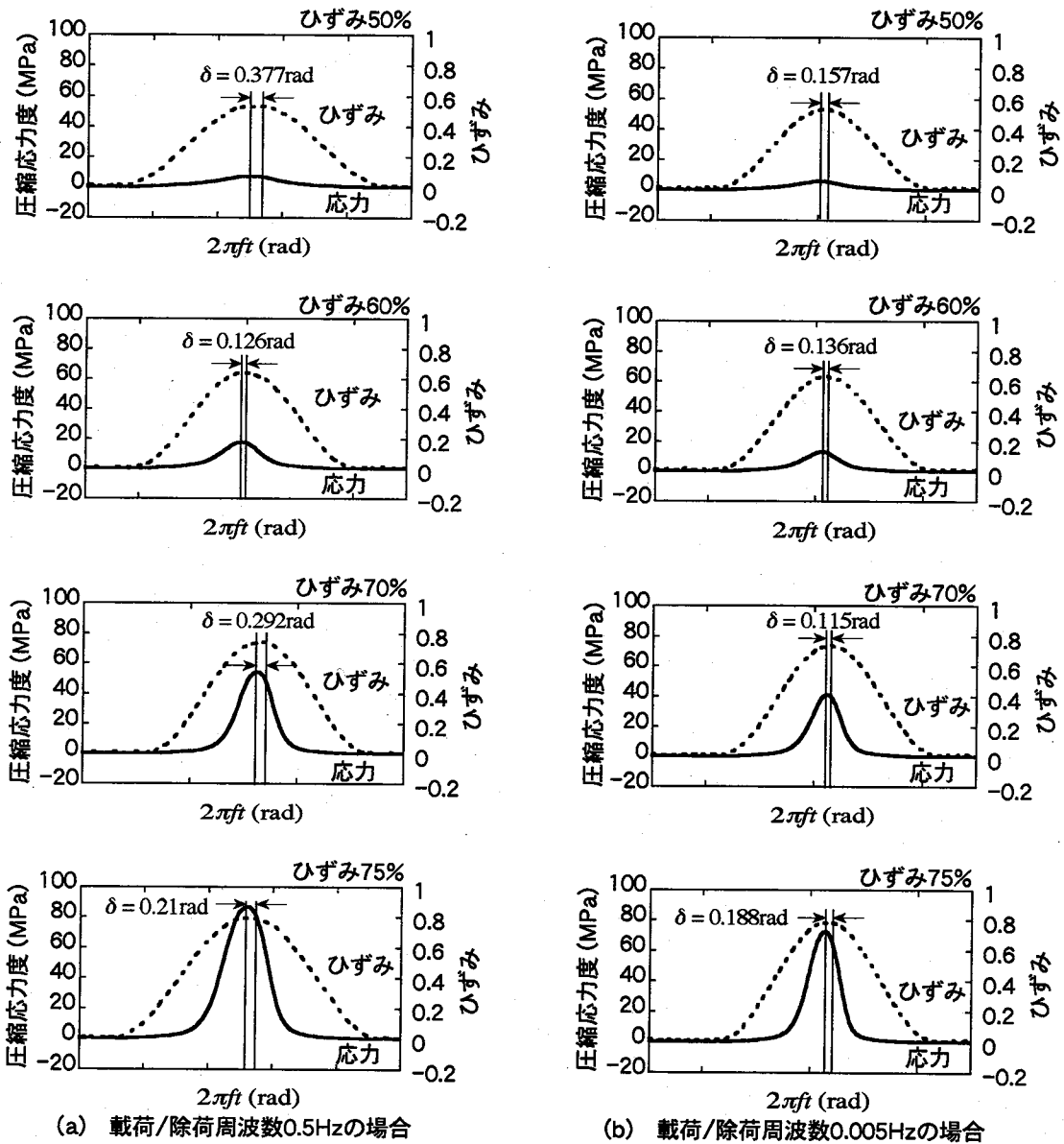


図-13 ひずみ ε と応力 σ の時刻歴 (NR-G12 の場合)

ことにより、擬動的弾性率 E_e^* と擬損失弾性率 E_v^* がどれだけ変化するかに着目すると、NR-G12 では、擬動的弾性率 E_e^* は 1.2~1.33 倍に、擬損失弾性率 E_v^* は 1.23~3.37 倍になる。加振周波数が増加するにつれて、擬動的弾性率 E_e^* が大きくなることはばねが硬化することを、擬損失弾性率 E_v^* が大きくなることは粘性の影響が大きくなることを意味する。したがって、加振周波数を 0.005Hz から 0.5Hz に高めた結果、擬損失弾性率 E_v^* の変化の度合いが擬動的弾性率 E_e^* の変化の度合いよりも大きくなることは、ばねの硬化よりも粘性の影響がより顕著であることを示している。

これらの結果は、NR-G6 や HDR の場合 (図-15 および表-4 参照) に対しても同様である。特に、HDR の擬損失弾性率 E_v^* は、载荷/除荷周波数 f を 0.005Hz から 0.5Hz に高めると、HDR-G12 の場合には 2.1~5.5 倍、HDR-

G6 の場合には 2.1~3.7 倍と NR の擬損失弾性率 E_v^* の変化よりも大きくなっており、HDR では NR よりもさらに粘性機構がばね機構よりも顕著に表れる。

図-16 は、NR と HDR に対して擬損失係数 l^* を比較した結果である。载荷/除荷周波数 f が大きくなると擬損失係数 l^* が大きくなるという傾向は NR、HDR とともに同じである。しかし、NR-G12 に比較すると HDR-G12 の擬損失係数 l^* は最大 4.4 倍程度、NR-G6 に比較すると HDR-G6 の擬損失係数 l^* は最大 3.2 倍程度、それぞれ大きい。これは、式(26)の擬損失係数 l^* の定義からもわかるように、圧縮変形する間の熱の逸散が HDR のほうが NR よりも大きいことを意味する。この結果は、図-7 に示す HDR のエネルギー吸収率 Δw が NR に比べて 1~3 倍大きいことと整合する。

表-3 NR-G12とNR-G6の応力の位相進み δ ，擬動的弾性率 E_e^* ，擬損失弾性率 E_v^* ，擬損失係数 l^*

(a) NR-G12の場合

与ひずみ	載荷/除荷周波数 (Hz)	位相進み (rad)	擬動的弾性率 (MPa)	擬損失弾性率 (MPa)	擬損失係数
ひずみ50%	0.005	0.157	10.56	1.67	0.158
	0.5	0.377	12.58	4.98	0.396
ひずみ70%	0.005	0.115	54.84	6.35	0.116
	0.5	0.292	71.22	21.42	0.301
ひずみ75%	0.005	0.188	89.45	17.06	0.191
	0.5	0.21	107.7	23.01	0.214

(b) NR-G6の場合

与ひずみ	載荷/除荷周波数 (Hz)	位相進み (rad)	擬動的弾性率 (MPa)	擬損失弾性率 (MPa)	擬損失係数
ひずみ50%	0.005	0.21	5.47	1.16	0.213
	0.5	0.355	6.57	2.43	0.371
ひずみ60%	0.005	0.126	9.05	1.14	0.126
	0.5	0.148	11.83	1.76	0.149
ひずみ70%	0.005	0.136	19.26	2.63	0.137
	0.5	0.292	25.13	7.56	0.301
ひずみ75%	0.005	0.167	31.89	5.39	0.169
	0.5	0.398	40.9	11.47	0.28

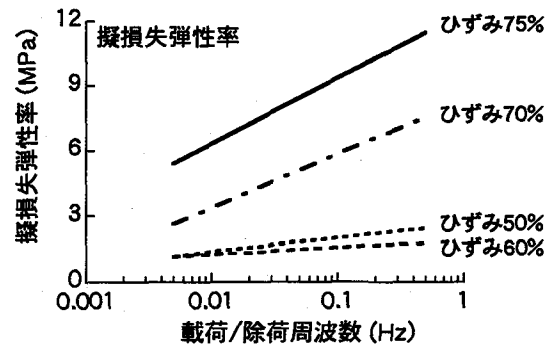
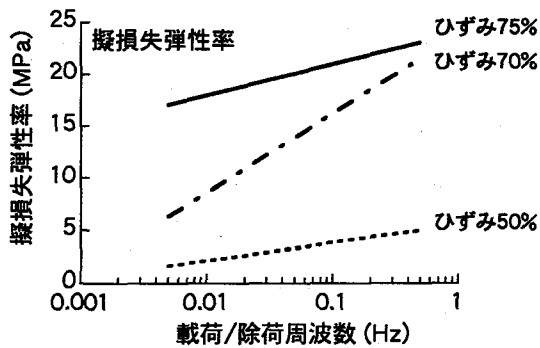
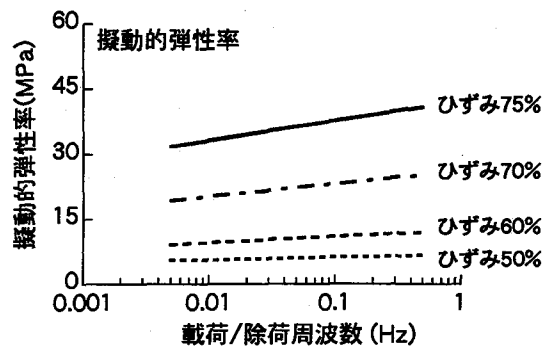
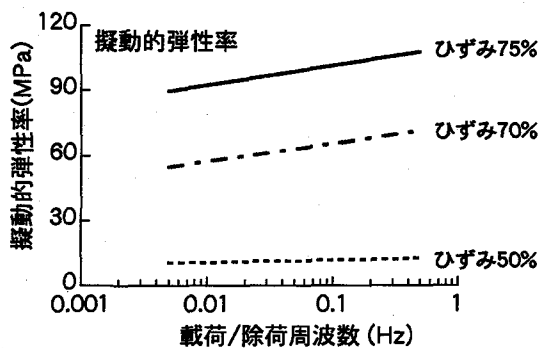
表-4 HDR-G12とHDR-G6の応力の位相進み δ ，擬動的弾性率 E_e^* ，擬損失弾性率 E_v^* ，擬損失係数 l^*

(a) HDR-G12の場合

与ひずみ	載荷/除荷周波数 (Hz)	位相進み (rad)	擬動的弾性率 (MPa)	擬損失弾性率 (MPa)	擬損失係数
ひずみ50%	0.005	0.325	12.02	4.04	0.336
	0.5	0.732	14.69	13.2	0.899
ひずみ60%	0.005	0.147	17.68	2.61	0.148
	0.5	0.503	26.11	14.35	0.55
ひずみ70%	0.005	0.199	33.08	6.67	0.202
	0.5	0.251	54.55	14.01	0.257
ひずみ75%	0.005	0.136	49.39	6.76	0.137
	0.5	0.21	76.57	16.36	0.214

(b) HDR-G6の場合

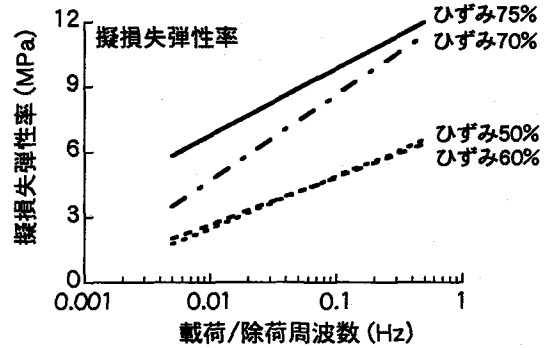
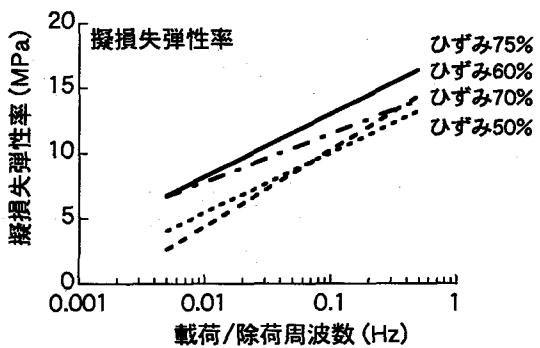
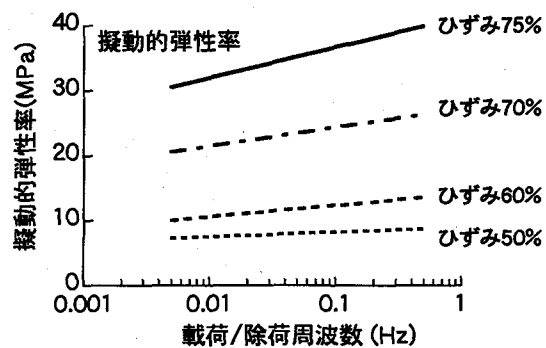
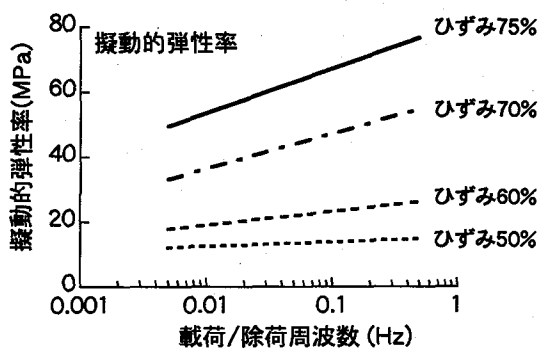
与ひずみ	載荷/除荷周波数 (Hz)	位相進み (rad)	擬動的弾性率 (MPa)	擬損失弾性率 (MPa)	擬損失係数
ひずみ50%	0.005	0.241	7.24	1.78	0.246
	0.5	0.65	8.63	6.56	0.761
ひずみ60%	0.005	0.199	9.97	2.01	0.202
	0.5	0.44	13.53	6.36	0.471
ひずみ70%	0.005	0.167	20.59	3.48	0.169
	0.5	0.408	26.29	11.38	0.433
ひずみ75%	0.005	0.188	30.47	5.81	0.191
	0.5	0.292	39.87	11.99	0.301



(a) NR-G12の場合

(b) NR-G6の場合

図-14 NRの擬動的弾性率 E_e^* , 擬損失弾性率 E_v^*



(a) HDR-G12の場合

(b) HDR-G6の場合

図-15 HDRの擬動的弾性率 E_e^* , 擬損失弾性率 E_v^*

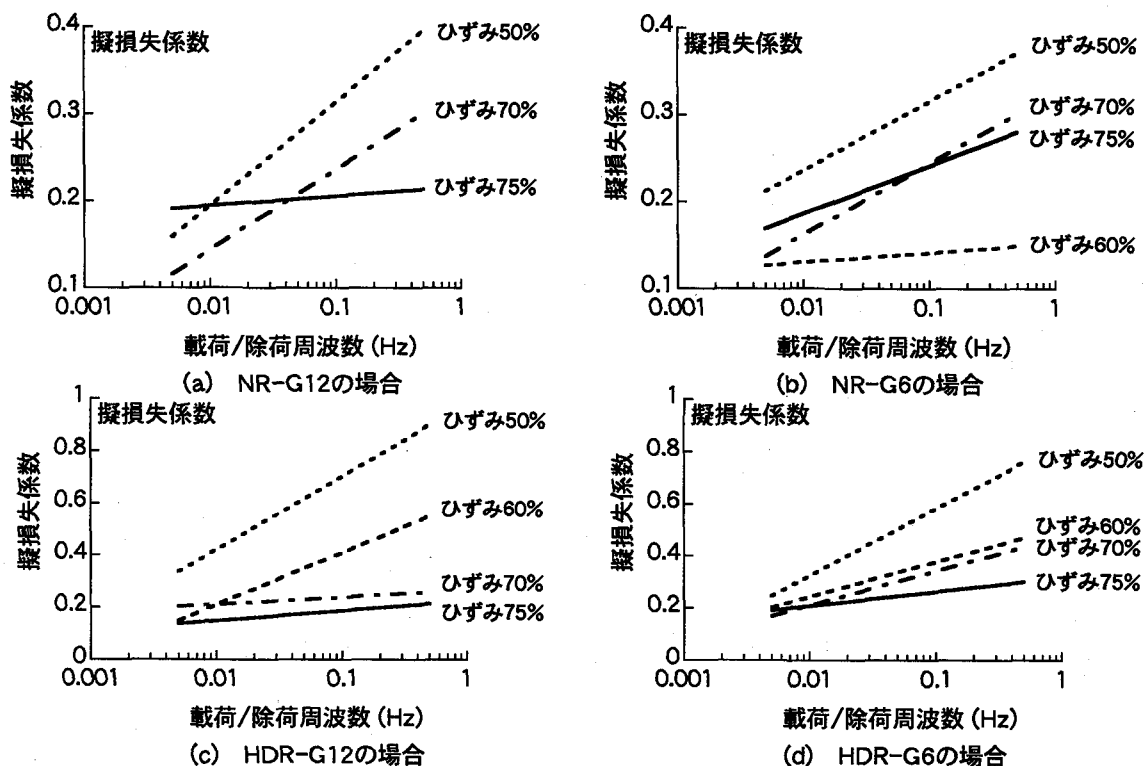


図-16 NR と HDR の擬損失係数 l^*

5. 結論

本研究では、70%以上のひずみが生じ、50MPa以上の高面圧を受けるゴム製緩衝装置の応力度—ひずみ関係について一軸圧縮荷重実験より検討した。検討のポイントは、天然ゴム (NR) と高減衰ゴム (HDR) のエネルギー吸収性能の相違、静的せん断弾性係数 G および载荷/除荷周波数 f の影響である。本研究から得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- 1) NR, HDRともにゴム製緩衝装置の応力度—ひずみ関係は、70%以上のひずみが生じると大きくハードニングし、従来のゴム系支承で考慮されている8~12MPaの5倍以上の面圧が作用する。しかし、応力度—ひずみの履歴曲線はNR, HDRともに安定している。割線弾性係数 E を初期弾性係数 E_0 で除した弾性係数比 η でハードニングの程度を評価すると、例えばNR-G12の場合には、ひずみが40%を越えると弾性係数比 η は1より大きくなり始め、ひずみが75%付近では割線弾性係数 E は初期弾性係数 E_0 の20倍近くにも達する。
- 2) NR と HDR の違いは、除荷時における残留変形の程度、繰り返し荷重を受けた場合の処女荷重以降の履歴曲線、载荷/除荷の1サイクルにおけるエネルギー吸収率 Δw に現れる。
- 3) 除荷時における残留変形はNRよりもHDRが大きい。

载荷前に比較して载荷/除荷後の供試体の高さがどの程度変化するかをNR-G12 と HDR-G12 で比較すると、NR-G12 の場合には2.5~4.6%短くなる程度で、除荷時には载荷前の形状にほぼ戻るが、HDR-G12 の場合には8.8~13.4%短くなり、NRと比較して残留変形が大きい。

4) 繰り返し荷重を受けた場合の処女荷重以降の履歴曲線はNRよりHDRがより顕著に影響を受ける。NRの場合には3回の繰り返し荷重による同一ひずみ時の応力度の低下はわずかであり、3回の履歴曲線はほとんど一致する。しかし、HDRの場合には処女荷重より2回目、3回目の荷重では同一ひずみ時における応力度が低下する。

5) エネルギー吸収率 Δw はHDRがNRよりも大きい。HDRのエネルギー吸収率 Δw は载荷/除荷の繰り返し回数が多くなるにつれて低下するが、3回目においてもNRより3倍程度大きなエネルギー吸収率 Δw を有する。

6) 3)~5)に示した点はHDRの欠点ではなく、こういう特性が存在することを見込んだ上でこれらの特性をうまく設計に生かすことが重要である。

7) NRに対してゴム弾性統計理論に従って弾性係数 E の理論値を求めると、理論値はひずみが30%前後を境にそれより小さいひずみ領域では実験値の89~116%となり、実験値の特徴をよく表す。しかし、30%以上のひずみ領域では理論値は実験値の最大256%にも達し、実験値を過大に評価する。

8) 載荷/除荷周波数 f を 0.005Hz から 0.5Hz に高めると、NR と HDR の擬動的弾性率 E_e^* と擬損失弾性率 E_v^* はともに大きくなる。加振周波数の増加に伴って、粘性機構を反映する擬損失弾性率 E_v^* の変化の度合いは、NR-G12 の場合には 1.2~3.4 倍、NR-G6 の場合には 1.5~2.9 倍と、ばね機構を反映する擬動的弾性率 E_e^* の変化よりも大きくなる。この結果は HDR に対しても同様である。

9) 載荷/除荷周波数 f を高めると、NR と HDR の擬損失係数 l^* は大きくなる。特に、HDR の擬損失係数 l^* が NR よりも最大 3.2~4.4 倍程度大きい。これは、圧縮変形する間の熱の逸散が HDR のほうが NR よりも大きいことを意味する。

参考文献

- 1) 矢部正明, 武村浩志, 川島一彦: 直橋および斜橋の桁間衝突とその影響, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.43A, pp.781-791, 1997.3.
- 2) 川島一彦, 庄司学: 衝突緩衝用落橋防止システムによる桁間衝突の影響の低減効果, 土木学会論文集, No.612/I-46, pp.129-142, 1999.1.
- 3) 社団法人日本道路協会: 道路橋支承便覧, 1991.
- 4) Forster, M. J.: Unilateral Compression of Rubber, *J. Appl. Phys.*, Vol. 26, No. 9, pp.1104-1106, 1955.
- 5) Payne, A. R.: Effect of Shape on the Static and Dynamic Stress-Strain Relationship of Bonded Rubber in Compression, *Nature*, London, Vol. 177, pp.1174-1175, 1956.
- 6) Gent, A. N. and Lindley, P. B.: The Compression of Bonded Rubber Blocks, *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, London, Vol. 173, No. 3, pp.111-117, 1959.

7) Treloar, L. R. G.: *The Physics of Rubber Elasticity*, Oxford, 2nd ed., 1958.

8) Beatty, M. F.: Elastic Stability of Rubber Bodies in Compression, *Am. Soc. Mech. Eng. Appl. Mech. Div.*, Vol. 27, pp.125-150, 1977.

9) 深堀美英: 免震ゴムの設計力学および最近の動向, 日本ゴム協会誌, 第 69 巻, 第 4 号, pp.35-48, 1996.

10) Mori, A., Carr, A. J., Cooke, N. and Moss, P. J.: Compression Behaviour of Bridge Bearings used for Seismic Isolation, *Engineering Structures*, Vol. 18, No. 5, pp.351-362, 1996.

11) 窪田賢司, 菅野匡, 飯束義夫, 堀江啓夫: 制震効果を有する緩衝材を併設した落橋防止壁の一提案, 第 1 回免震・制震コロキウム講演論文集, 土木学会, pp.217-224, 1996.11.

12) 川島一彦, 庄司学, 黒田益夫, 長谷川恵一, 島ノ江哲: ゴム製緩衝装置の大変形圧縮特性とその有効性に関する実験的研究, Report No.TIT/EERG98-11, 耐震工学研究グループ, 東京工業大学土木工学科, 1998.10.

13) 伊津野和行, 児島孝之, 鈴木亮介, 和田教志, 濱田謙, 吉野伸: ゴム材の圧縮変形を利用した地震時反力分散装置の開発, 土木学会論文集, No.563/I-39, pp.71-78, 1997.4.

14) 園田佳巨, 衛藤芳昭, 石川信隆, 生駒信康, 彦坂照: ゴム緩衝ピンを用いた落橋防止連結板の静的および動的応答特性に関する実験的考察, 土木学会論文集, No.598/I-44, pp.333-346, 1998.7.

15) Schaefer, R. J.: Mechanical Properties of Rubber, *Shock and Vibration Handbook Edited by C. M. Harris*, McGraw-Hill, 4th ed., Chapter 34, 1995.

(1999 年 9 月 17 日受付)