

緩衝材物性および载荷/除荷周波数が異なる場合の
ゴム製緩衝装置の応力度—ひずみ関係

庄司学¹・川島一彦²・宇根寛³・劔持安伸³・長谷川恵一⁴・島ノ江哲⁵

- 1 正会員 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 フェロー 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科（同上）
- 3 学生会員 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻（同上）
- 4 正会員 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 正会員 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）

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。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ため¹⁾、このような大きな衝突力に対してはゴム材の圧縮変形を利用したゴム製緩衝装置が有望である。

しかし、ゴム製緩衝装置には、ゴム系支承の設計で通常考慮される 8MPa レベルの面圧²⁾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、高面圧が作用した場合のゴム製緩衝装置の応力度—ひずみ関係に対する実験的・理論的検討が重要となる。以上より、本研究では、50MPa 以上の高面圧が作用し、70%以上の高ひずみが生じた場合のゴム製緩衝装置の応力度—ひずみ関係を一軸圧縮载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 や载荷/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。ゴム材は天然ゴムと高減衰ゴム（以下、NR, HDR と表記）を対象とし、それぞれに対して静的せん断弾性係数 G を 0.6MPa と 1.2MPa（以下、G6, G12 と表記）

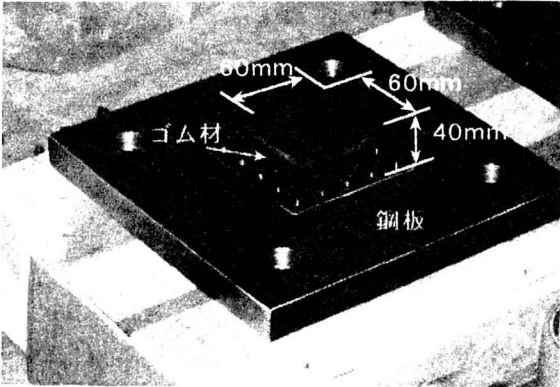


写真-1 ゴム製緩衝装置

表-1 各供試体の引張強さ、伸び、硬さ

	NR-G6	NR-G12	HDR-G6	HDR-G12
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

の 2 通りとした。これらの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。形状係数 s は、受圧面積（初期断面積） A_0 を側面積 A_s で除して次式より求められ、ここでは 0.375 となる。

$$s = \frac{A_0}{A_s} = \frac{a^2}{4ah} = \frac{a}{4h} \tag{1}$$

ゴム材の下面には、緩衝装置を桁端部に取り付け

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/除荷速度 (mm/s)							
						振幅1		振幅2		振幅3		振幅4	
載荷	除荷	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

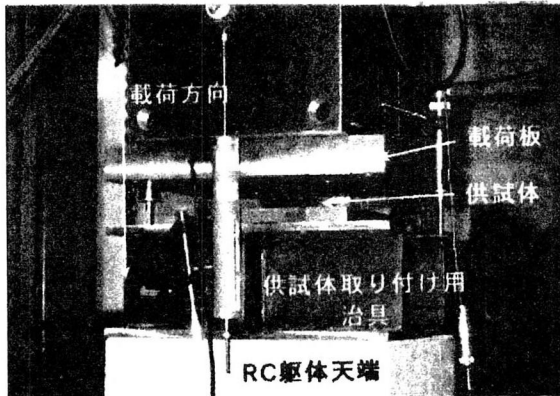


写真-2 載荷状況

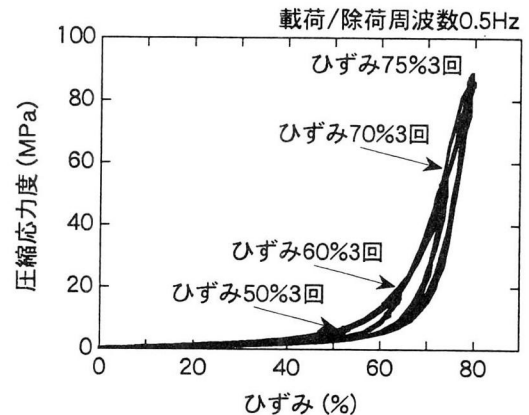


図-1 NR-G12の応力度—ひずみ関係

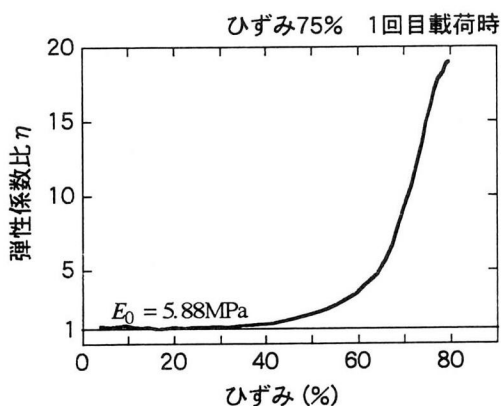


図-2 NR-G12の弾性係数比 η

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、すなわち本実験においては載荷装置の載荷板と直接接触する。

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平行になるように一軸圧縮載荷を行った。

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 は与えるひずみの最大振幅 $\varepsilon_{\max}$ が 50%，60%，70%，75% となるように設定した。載荷/除荷速度のオーダーは載荷

/除荷周波数 f を 100 倍に変化させているため、 $\alpha(10^{-1} \text{ mm/sec})$ から $\alpha(10^1 \text{ mm/sec})$ まで 100 倍に変化する。また、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℃の範囲であった。

3. 緩衝材物性および載荷/除荷周波数の影響

(1) 高面圧下における応力度—ひずみ関係

載荷/除荷周波数 f を 0.5Hz とした場合の NR-G12 供試体の応力度—ひずみ関係を図-1 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も緩衝装置の応力度—ひずみ曲線は安定している。圧縮変形が進むと緩衝装置の側面が面外に大きくはらみ出すが、除荷後にはほぼもとの状態に戻っており、外的損傷も生じていない。

ここで、緩衝装置の弾性係数 E を初期弾性係数 E_0 ($=5.88 \text{ MPa}$) で除して、弾性係数比 η を次式により定義する。

$$\eta = \frac{E}{E_0} \quad (2)$$

図-2 は、式(2)より求められた弾性係数比 η とひずみ 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 回目の載荷曲線に対して求めたものである。これは、NR の場合、後述するように 1～3 回目の履歴曲線がほとんど同じになるため

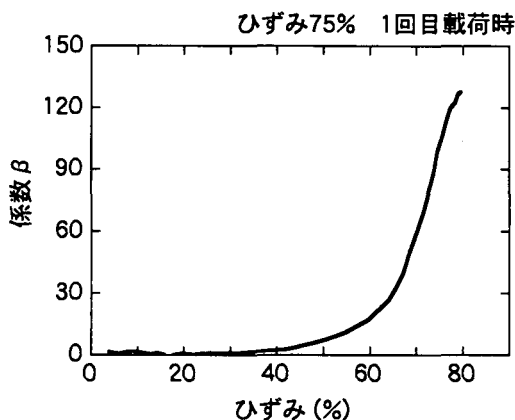


図-3 係数 β とひずみの関係 (NR-G12の場合)

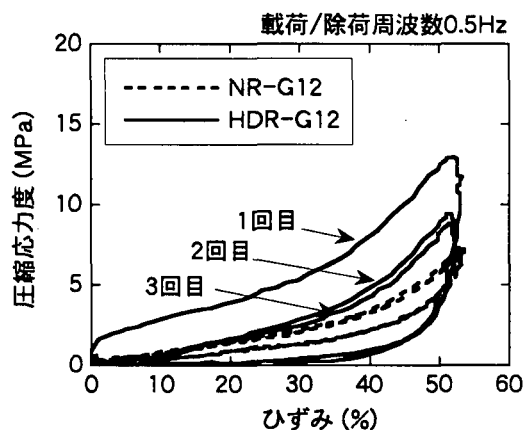


図-5 NR-G12とHDR-G12の応力度—ひずみ関係の比較 (ひずみ50%の場合)

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75%付近では弾性係数 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³⁾。

$$E = E_0(1 + \beta \cdot s^2) \quad (3)$$

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(3)は係数 β について次式のように書き換えられる。

$$\beta = \frac{1}{s^2} \left(\frac{E}{E_0} - 1 \right) = \frac{1}{s^2} (\eta - 1) \quad (4)$$

いま、式(1)による形状係数 s と式(2)による弾性係数比 η を式(4)に代入し、係数 β を求め、ひずみ ε との関係を示すと図-3のようになる。図-2と同様の傾向ではあるが、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75%付近では120程度まで大きくなっている。図-2および図-3の結果は、高ひずみ/高面圧領域におけるゴム製緩衝装置の応力度—ひずみ関係が古典的な弾性論では説明しきれないことを示している。

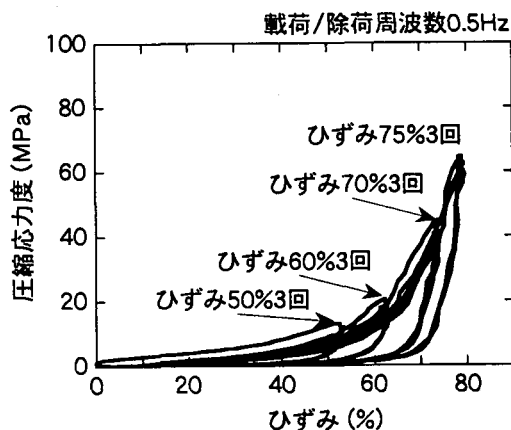


図-4 HDR-G12の応力度—ひずみ関係

(2) NR と HDR の相違

図-4には、載荷/除荷周波数 f を0.5Hzとした場合のHDR-G12供試体の応力度—ひずみ関係を示す。図-5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供試体で比較した結果である。NR-G12の場合には3回の繰り返し載荷による応力度の低下はわずかであり、応力度—ひずみ関係は載荷/除荷の繰り返し回数、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、1回目の処女載荷に比較して2回目、3回目の載荷では同一ひずみにおける応力度は43~67%程度低下する。

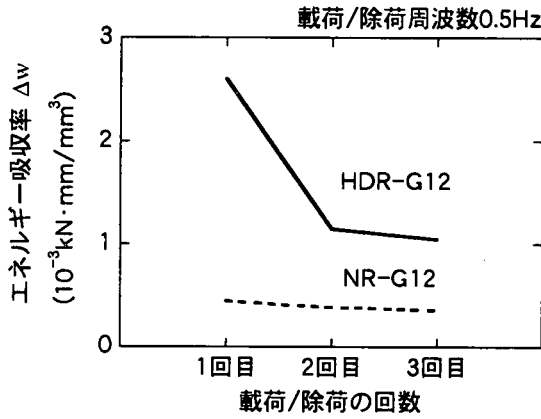
ここで、緩衝装置の体積を v として、各載荷/除荷過程における単位体積当たりのエネルギー吸収率 Δw は次式より求められる。

$$\Delta w = \frac{1}{v} \int F \cdot dx \quad (5)$$

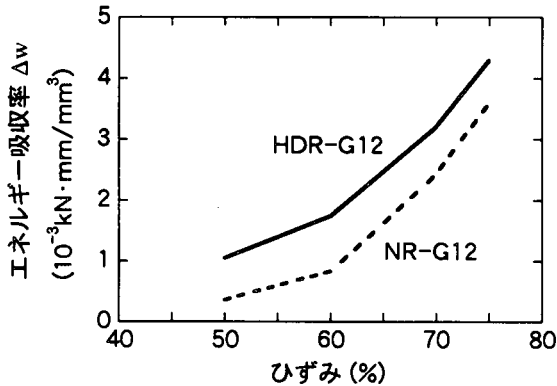
図-6は、NR-G12供試体とHDR-G12供試体のエネルギー吸収率 Δw を比較した結果である。図-6(a)より、ひずみが50%の場合には、載荷/除荷の繰り返し回数が進むにつれてHDR-G12のエネルギー吸収率 Δw は低下する。特に2回目は1回目の1/2以下になる。しかし、3回目においてもNR-G12より3倍程度大きなエネルギー吸収率 Δw を有する。図-6(b)より、NR-G12のエネルギー吸収率 Δw は、ひずみが50%の場合にはHDR-G12の1/3程度であったものが、ひずみが進展し、75%に達するとHDR-G12の8割程度まで高まる。しかし、いずれにせよHDR-G12のほうが大変形時のエネルギー吸収性能は大きい。

(3) 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



(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-6 エネルギー吸収率 Δw の比較

み関係をひずみ 75%の場合について比較した結果が図-7 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。

ここで、図-8 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⁴⁾によると、せん断弾性係数 G と伸長比 λ_i ($i=1,2,3$)を用いて次式により求められる。

$$W = \frac{1}{2}G(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) \quad (6)$$

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。

$$\lambda_i = \frac{l_i}{l_{i0}} \quad (i=1,2,3) \quad (7)$$

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(7)は次式のように書き換えられる。

$$W = \frac{1}{2}G(\lambda_1^2 + \frac{2}{\lambda_1} - 3) \quad (8)$$

したがって、初期断面積 A_0 に対する応力度 σ_1 は

$$\sigma_1 = \frac{\partial W}{\partial \lambda_1} = G(\lambda_1 - \frac{1}{\lambda_1^2}) \quad (9)$$

で与えられ、弾性係数 E は式(9)を伸長比 λ_1 で微分し

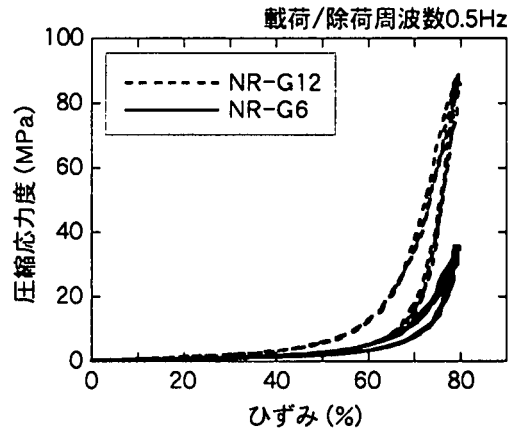


図-7 NR-G12とNR-G6の応力度—ひずみ関係の比較 (ひずみ75%の場合)

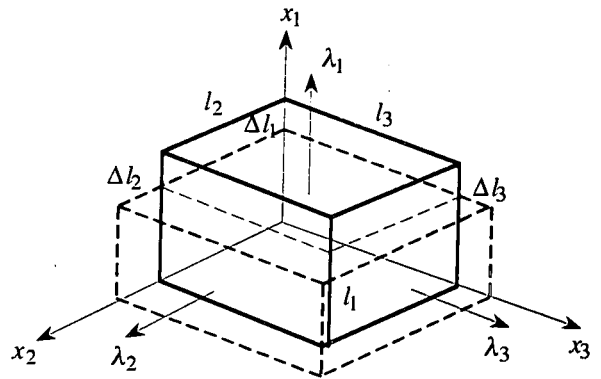


図-8 回転を伴わない一様な変形状態

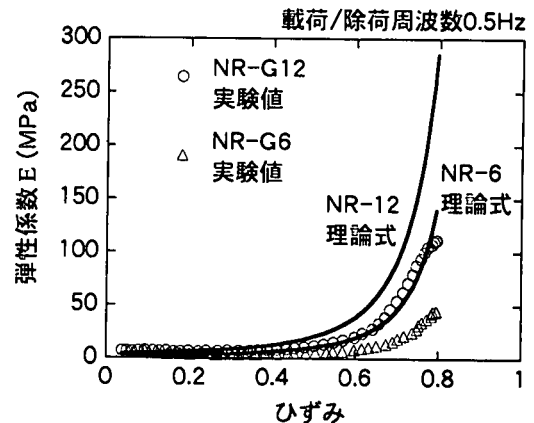


図-9 弾性係数 E の実験値と式(13)による理論式の比較 (ひずみ75%の場合)

て

$$E(\lambda_1) = G \cdot (1 + \frac{2}{\lambda_1^3}) \quad (10)$$

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

$$\lambda_1 = 1 - \epsilon \quad (11)$$

で与え、式(10)をひずみ ϵ について書き換えればよい。

図-9 は、NR-G12 供試体と NR-G6 供試体に対し弾性係数 E の実験値と式(11)による理論値を比較

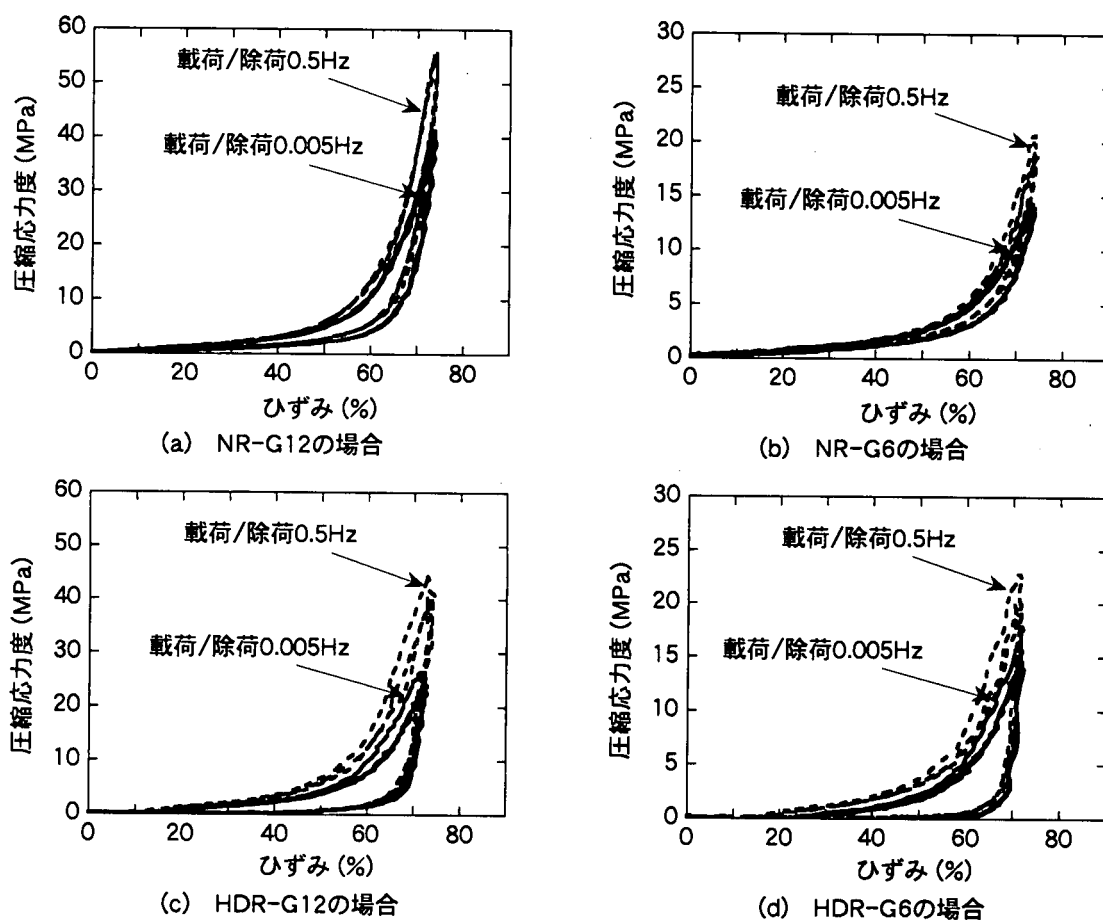


図-10 載荷/除荷周波数 f の影響

した結果である。実験値はひずみが75%に達した場合の1回目の載荷曲線に対する値である。理論値は、ひずみが30%前後を境に、それ以下の微小ひずみ領域では実験値をやや過小に評価し、それ以上の大ひずみ領域では過大評価する。これは、大ひずみ領域においては、式(6)の自由エネルギー w を導出する際、非圧縮性の仮定やゴム分子間の架橋距離の仮定（ガウス分布）⁴⁾ などが成り立たなくなり、また、ゴム分子の配向や結晶化が進むためである。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-10 のようになる。載荷/除荷周波数 f が 100 倍高くなると、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。また、HDR の場合には載荷/除荷周波数 f の影響をより受けやすく、その応力度は HDR-G12 の場合には 71% 程度、HDR-G6 の

場合には 40% 程度大きくなる。これらの結果は、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と考えられる。

4. 結論

本研究では、50MPa 以上の高面圧が作用し、70% 以上のひずみが生じた場合のゴム製緩衝装置の応力度—ひずみ関係について一軸圧縮載荷実験より検討した。得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- 1) NR-G12 の応力度—ひずみ関係は、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安定している。
- 2) ひずみが 40% を越えると弾性係数比 η は大きくなり始め、ひずみ 75% 付近では弾性係数 E は初期弾性係数 E_0 の 20 倍近くにも達する。
- 3) NR-G12 の場合は 3 回の繰り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

載荷/除荷の履歴経験にほとんど依存しないが、HDR-G12 の応力度-ひずみ関係は履歴経験に依存し、1 回目の処女載荷より 2 回目、3 回目の載荷では応力度が低下する。

4) HDR-G12 のエネルギー吸収率 Δw は、あるひずみ領域において載荷/除荷の繰り返し回数が進むにつれて低下するが、3 回目においても NR-G12 より大きなエネルギー吸収率 Δw を有する。

5) ゴム状弾性統計理論から導かれる弾性係数 E の理論値は、ひずみが 30% 付近を境に、それ以下の微小ひずみ領域では実験値をやや過小に、それ以上の大ひずみ領域では過大に評価する。

6) 載荷/除荷周波数 f が 100 倍高くなると、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。また、HDR の場合には載荷/除荷周波数 f の影響をより受けやすく、その応力度は HDR-G12 の場合には 71% 程度、HDR-G6 の場合には 40% 程度大きくなる。

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) 社団法人日本道路協会: 道路橋支承便覧, 1991.
- 3) 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.
- 4) Treloar, L. R. G.: *The Physics of Rubber Elasticity*, Oxford, 2nd ed., 1958.