

緩衝材物性および載荷/除荷速度が ゴム製緩衝装置の応力度—ひずみ関係に与える影響

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 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 土木工学科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

³学生員 東京工業大学大学院 理工学研究科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

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)

免震支承や積層ゴム支承で支持された長周期の橋梁においては、隣接桁どうしや桁と橋台間で衝突が起こり、桁重量に相当する衝突力が生じる可能性がある。本研究では、そのような大きな衝突力を緩和するためのゴム製緩衝装置に対して一軸圧縮載荷実験を行い、50MPa以上の高面圧下における緩衝装置の圧縮性能を検討した。具体的には、天然ゴムと高減衰ゴムの2種類の緩衝材を用い、せん断弾性係数を0.6MPaと1.2MPaの2通りに変化させ、また、載荷/除荷速度がゴム製緩衝装置の応力度—ひずみ関係に与える影響について検討した。

Key Words : seismic design, bridge, pounding, shock absorber, rubber, loading rate

1. はじめに

免震支承や積層ゴム支承で支持された長周期の橋梁においては、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と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、桁重量に相当する大きな衝突力が生じるため^{1), 2)}、衝突緩衝用の装置には大きな面圧が作用することとなる。緩衝装置にはこのような高面圧作用下においても安定した応力度—ひずみ関係となることが求められ、そのような条件を満足する装置としてゴム材を利用した緩衝装置が有望である。以上を踏まえ、本研究では、50MPa以上の高面圧下におけるゴム製緩衝装置の圧縮性能を一軸圧縮実験により検討し、緩衝材物性や載荷/除荷速度がゴム製緩衝装置の応力度—ひずみ関係に及ぼす影響について検討した。

2. 実験供試体および実験方法

対象とした実験供試体を写真-1に示す。ゴム材としては天然ゴム (NR) と高減衰ゴム (HDR) の2種類を用い、それぞれに対してせん断弾性係数 G を

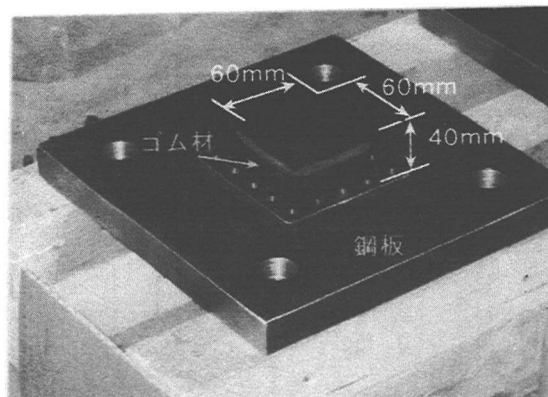


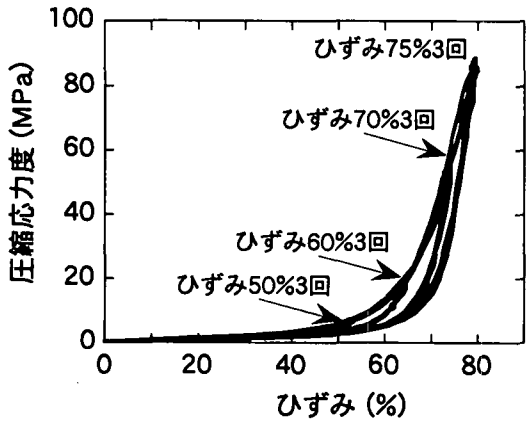
写真-1 実験供試体 (NR-G12の場合)



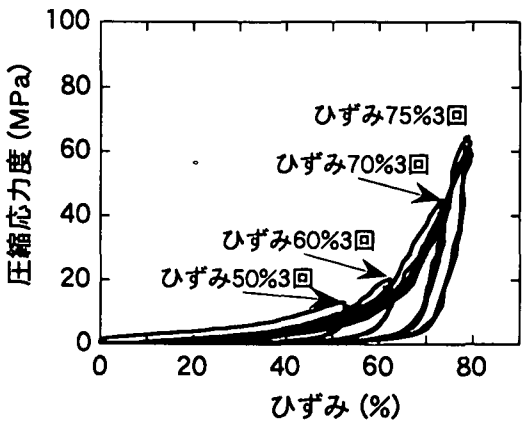
写真-2 載荷状況

表-1 各実験ケースにおける载荷振幅、繰り返し回数、载荷速度

実験ケース	载荷振幅				振幅1		振幅2		振幅3		振幅4	
	振幅1	振幅2	振幅3	振幅4	载荷mm/s	除荷mm/s	载荷mm/s	除荷mm/s	载荷mm/s	除荷mm/s	载荷mm/s	除荷mm/s
NR-G12-1	10mm3回	12mm3回	14mm3回	15mm3回	31.4	31.4	37.68	37.68	43.96	43.96	47.1	47.1
NR-G12-2	10mm3回	12mm3回	14mm3回	15mm1回	31.4	0.314	37.68	0.3768	43.96	0.4396	47.1	0.471
NR-G12-3	10mm3回	12mm3回	14mm3回	15mm2回	0.314	0.314	0.3768	0.3768	0.4396	0.4396	0.471	0.471
NR-G6-1	10mm3回	12mm3回	14mm3回	15mm3回	31.4	31.4	37.68	37.68	43.96	43.96	47.1	47.1
NR-G6-2	10mm3回	12mm3回	14mm3回	15mm3回	31.4	0.314	37.68	0.3768	43.96	0.4396	47.1	0.471
NR-G6-3	10mm3回	12mm3回	14mm3回	15mm3回	0.314	0.314	0.3768	0.3768	0.4396	0.4396	0.471	0.471
HDR-G12-1	10mm3回	12mm3回	14mm3回	15mm3回	31.4	31.4	37.68	37.68	43.96	43.96	47.1	47.1
HDR-G12-2	10mm3回	12mm3回	14mm3回	15mm3回	0.314	0.314	0.3768	0.3768	0.4396	0.4396	0.471	0.471
HDR-G6-1	10mm3回	12mm3回	14mm3回	15mm3回	31.4	31.4	37.68	37.68	43.96	43.96	47.1	47.1
HDR-G6-2	10mm3回	12mm3回	14mm3回	15mm3回	0.314	0.314	0.3768	0.3768	0.4396	0.4396	0.471	0.471



(a) NR-G12の場合



(b) HDR-G12の場合

図-1 NR-G12とHDR-G12の応力度-ひずみ関係

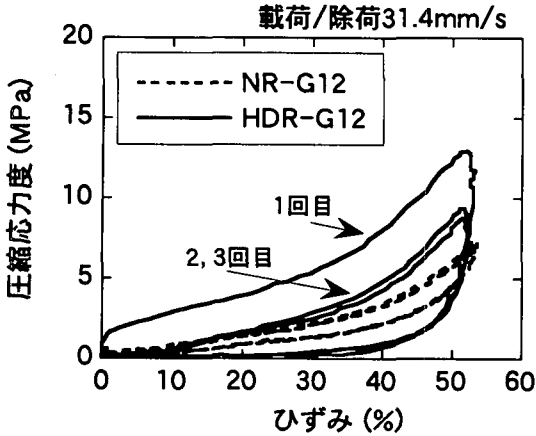


図-2 NR-G12とHDR-G12の応力度-ひずみ関係の比較 (ひずみ50%の場合)

0.6MPa (G6) と1.2MPa (G12) の2通りに変化させた。緩衝材の平面寸法は60mm×60mm、高さは40mmであり、形状係数は0.375である。緩衝材の下面には厚さ25mmの鋼板が加流接着されているが、この鋼板は桁端に緩衝装置を取り付けるためのものである。ゴム材の上面には鋼板は取り付けられておらず、相手側の桁と直接接触するようになっている。

ここで、载荷状況を写真-2に示す。平面寸法400mm×400mmの鉄筋コンクリート躯体の上面に治具を設置し、その治具に供試体の下面の鋼板を設置した。载荷/除荷は変位制御で行い、圧縮载荷面と供試体の上面が平行になるように一軸圧縮载荷を行った。表-1には、各実験ケースにおける载荷振幅、繰り返し回数、载荷/除荷速度を示す。载荷/除荷は正弦波で与えたが、その際には表-1に示す载荷振幅、载荷/除荷速度となるように正弦波の最大振幅と周波数を定めた。载荷/除荷の繰り返し回数はいずれの载荷振幅に対しても3回とした。载荷/除荷速度は $O(10^{-1} \text{ mm/sec})$ から $O(10^1 \text{ mm/sec})$ のオーダーまで100倍に変化させた。なお、実験を実施した際の実験棟の室温は13℃～21℃の範囲であったため、以下では温度による影響は考慮していない。

3. 緩衝材物性の影響

NRとHDR供試体に対して、载荷/除荷速度をともに $O(10^1 \text{ mm/sec})$ のオーダーにした場合の応力度—

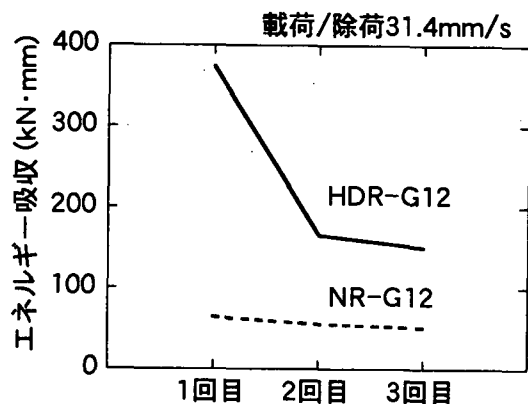


図-3 NR-G12とHDR-G12のエネルギー吸収の比較 (ひずみ50%の場合)

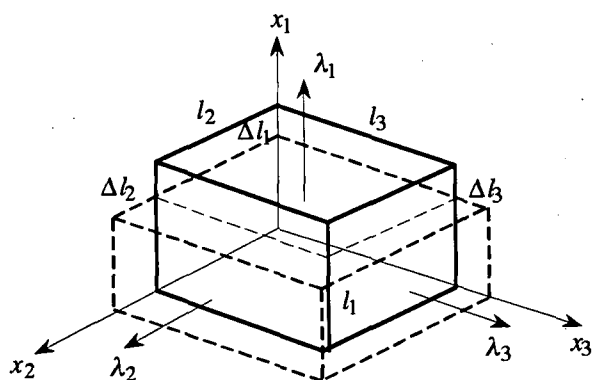


図-5 回転を伴わない様な変形状態

ひずみ関係を図-1に示す。せん断弾性係数 G はともに1.2MPaの場合である。また、図-2はひずみ50%の場合の応力度—ひずみ関係を比較した結果である。ここでは、応力度 σ とひずみ ε は次式で定義した。

$$\sigma = \frac{f_1}{A_0} ; \varepsilon = \frac{x_1}{l_{10}} \quad (1)$$

ここで、 f_1 : 圧縮荷重 (载荷装置のロードセルの値)、 A_0 : 緩衝装置の初期断面積、 x_1 : 圧縮変位 (载荷装置のLVDTの値)、 l_{10} : 緩衝装置の初期高さであり、応力度 σ とひずみ ε は平均応力度と平均ひずみを表している。

NRの場合には、70%以上のひずみとなると、弾性係数 E が初期弾性係数 E_0 ($\approx 5.88\text{MPa}$) に対して20倍程度大きくなり、50MPa以上の高面圧となるが、応力度—ひずみ曲線は安定している。従来のゴム系ダンパーでは8~12MPaの面圧までしか設計上考慮されていないが³⁾、その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ことになる。また、図-2より、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、NRの応力度—ひずみ関係は履歴経験にほとんど依存しない。一方、HDRの場合には、履歴

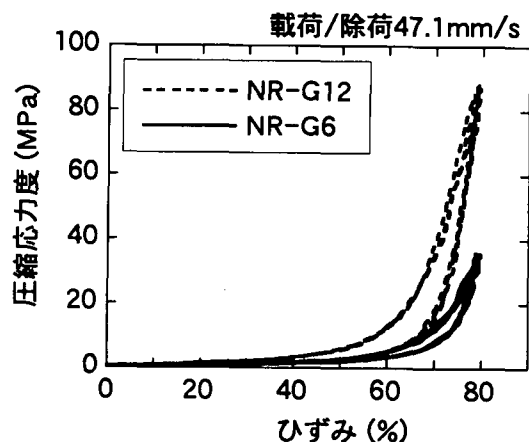


図-4 NR-G12とNR-G6の応力度—ひずみ関係の比較 (ひずみ75%の場合)

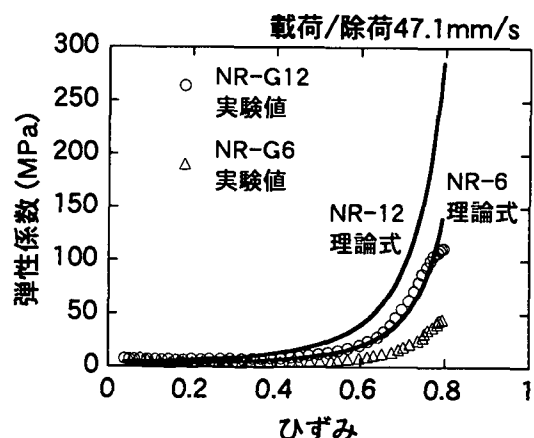


図-6 弾性係数 E の実験値と式(7)による理論式の比較 (ひずみ75%の場合)

経験に大きく依存し、3回の繰り返し载荷に対して、1回目の処女载荷と2回目、3回目の载荷では応力度—ひずみ曲線が異なってくる。

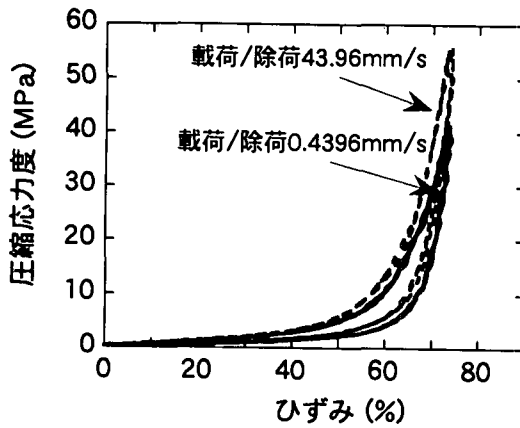
ここで、各载荷/除荷過程におけるエネルギー吸収 ΔW は次式により求められる。

$$\Delta W = \int f_1 \cdot dx_1 \quad (2)$$

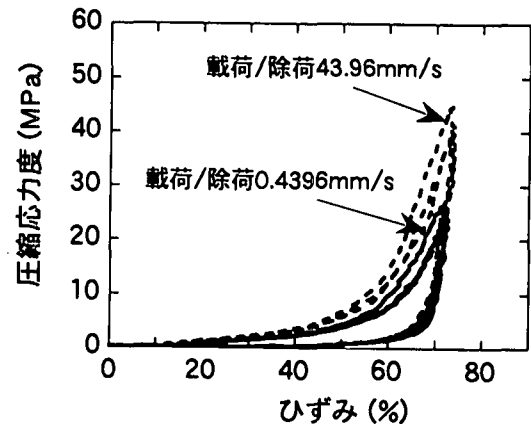
ひずみ50%の場合のエネルギー吸収 ΔW を3回の载荷ごとに示した結果が図-3である。NRの場合には3回の载荷においてもエネルギー吸収は安定しており、HDRの場合は载荷が進むにしたがってエネルギー吸収は低下する。しかし、3回目の载荷においてもHDRのほうがNRよりも3倍程度大きなエネルギー吸収を有する。

NR-G12とNR-G6の応力度—ひずみ関係をひずみ75%の場合について比較した結果が図-4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-5に示すような回転を伴わない様ひずみを受けた緩衝装置の自由エネルギー F 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 を用いて次式より求められる。

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



(a) NR-G12の場合



(b) HDR-G12の場合

図-7 荷重速度がNR-G12とHDR-G12の応力度-ひずみ関係に与える影響 (ひずみ70%の場合)

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

$$\lambda_i = \frac{l_i}{l_{i0}} \quad (4)$$

いま、非圧縮性 ($\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 = 1$) を仮定し、 x_1 方向の一軸圧縮変形のみとすると、式(3)は次式のように書き換えられる。

$$F = \frac{1}{2} G \cdot (\lambda_1^2 + \frac{2}{\lambda_1} - 3) \quad (5)$$

よって、初期断面積 A_0 に対する応力度 σ は

$$\sigma = \frac{\partial F}{\partial \lambda_1} = G \cdot (\lambda_1 - \frac{1}{\lambda_1^2}) \quad (6)$$

で与えられ、弾性係数 $E(\lambda_1)$ は式(6)を伸長比 λ_1 で微分して次式により求められる。

$$E(\lambda_1) = G \cdot (1 + \frac{2}{\lambda_1^3}) \quad (7)$$

ここでは、 $\lambda_1 = 1 - \varepsilon$ の関係を用いて伸長比 λ_1 のかわりにひずみ ε で式(7)を書き換えればよい。図-6は、NR-G12とNR-G6に対して弾性係数 E の実験値と式(7)による理論値を比較した結果である。なお、実験値は75%ひずみの1回目の荷重時の結果である。理論値は、ひずみが30%前後を境に、微小ひずみでは実験値をやや過小評価し、大ひずみでは過大評価する。よって、大変形域における応力度-ひずみ関係のモデル化が今後の課題である。

4. 荷重/除荷速度の影響

NR-G12とHDR-G12に対して、荷重/除荷速度を変化させた場合の応力度-ひずみ関係を比較すると図-7のようになる。荷重速度が $O(10^{-1} \text{ mm/sec})$ から $O(10^1 \text{ mm/sec})$ のオーダーに100倍大きくなると、応力度はNR-G12の場合には36%程度、HDR-G12の場合には70%程度大きくなる。これは、荷重速度が大

きくなるに従って、緩衝装置の粘性が寄与してくるためであると考えられる。また、HDR-G12のほうが荷重速度の影響を受けやすい。図-7にはNR-G12とHDR-G12の場合しか示していないが、NR-G6とHDR-G6についても同様の結果が得られている。なお、今回行った実験の範囲内では除荷速度による顕著な影響は見られなかった。

5. 結論

本研究では、50MPa以上の高面圧下において緩衝材物性や荷重/除荷速度がゴム製緩衝装置の応力度-ひずみ関係に及ぼす影響について一軸圧縮荷重実験より検討した。得られた知見は以下の通りである。

- (1) NRの応力度-ひずみ関係は50MPa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。HDRの応力度-ひずみ関係は履歴経験に依存するが、エネルギー吸収はNRよりも数倍大きくなる。
- (2) ゴム弾性統計理論から導かれる弾性係数の理論値は微小ひずみでは実験値をやや過小に、大ひずみでは過大に評価する。大変形域での応力度-ひずみ関係のモデル化が今後の課題である。
- (3) 荷重速度が $O(10^{-1} \text{ mm/sec})$ から $O(10^1 \text{ mm/sec})$ のオーダーに100倍大きくなると、応力度はNR-G12の場合には36%程度、HDR-G12の場合には70%程度大きくなる。今回行った実験の範囲内では除荷速度の影響はほとんど見られなかった。

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, 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: 道路橋支保便覧, 1991.
- 4) Treloar, L.R.G.: The Physics of Rubber Elasticity, 3rd ed., Oxford, 1975.