

衝突力を受けるゴム製緩衝装置の動的特性

島ノ江哲¹・長谷川恵一²・川島一彦³・庄司学⁴

¹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)

²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)

³フェロー会員 工博 東京工業大学教授 大学院理工学研究科土木工学専攻
(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

⁴正会員 修(工) 東京工業大学助手 大学院理工学研究科土木工学専攻(同上)

本論文は、地震時に衝突力を緩和するために桁間に設置するゴム製緩衝装置の動的特性を衝突実験装置を用いて検討した結果を報告するものである。緩衝装置は地震時に繰り返して衝撃的な地震力を受けるが通常のゴム支承等で用いられる8~15MPaの面圧に比較するとはるかに大きな面圧を受ける。このため、重量と速度をコントロールして供試体に衝突できるように設計された衝突実験装置を用いて、天然ゴムと高減衰ゴムを用いて作成した3種類の緩衝装置模型に対する衝突実験を行った。これより、緩衝装置のエネルギー吸収率や衝突力に及ぼす衝突速度、台車重量、衝突前のエネルギー等の影響に関して検討した。

Key Words : seismic design, seismic retrofit, bridge, pounding, shock absorber, unseating prevention device

1. はじめに

兵庫県南部地震ではフェールセーフ機能を持つべき落橋防止構造にも被害を受けた橋があり、改めて落橋防止構造に作用する地震力とその特性を考慮した落橋防止構造の設計手法の構築に関心が集まっている。従来、落橋防止構造の設計に考慮すべき地震力に対する研究例はわずかであり^{1)~5)}、実務設計では上部構造の死荷重反力に設計震度を乗じるだけの原始的な方法で落橋防止構造の設計地震力が求められている。しかしながら、落橋防止構造に作用する地震力は、桁間に作用する衝突力や桁間連結装置により大きく異なり、場合によっては桁重量を上回るような大きな水平力が作用することが指摘されている^{6)~8)}。

このような大きな地震力が複数回作用しても安定的に抵抗し、桁間の衝突力を緩和するために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。ゴム製緩衝装置を桁間緩衝装置に利用すると、通常、支承等の設計に用いられている8~15MPa程度の面圧をはるかに上回る大きな圧縮力が衝撃的に作用する。しかし、このような高面圧の圧縮力を衝撃的に受けた場合のゴム製緩衝装置の力学特性に関して検討された例はほとんどない^{9)~11)}。

このような観点から、衝突実験装置を用いて高面

圧の圧縮力を衝撃的に受けた場合のゴム製緩衝装置の力学特性に関して実験的に検討したので、この結果を報告する。

2. 衝突実験の概要

(1) 実験に用いた供試体

実験には表-1に示すように天然ゴムおよび高減衰ゴムを用いた桁間緩衝装置3体を用いた。天然ゴムとしては、建築免震用のゴム支承材料としてよく用いられる25%ひずみ時の弾性係数が0.43MPaの天然ゴム(以下、供試体1と呼ぶ)と、橋梁用のゴム支承材料としてよく用いられる25%ひずみ時の弾性係数が1MPaの天然ゴム(以下、供試体2と呼ぶ)の2種類を、また、高減衰ゴムとしては、25%ひずみ時の弾性係数が供試体1とほぼ同じ0.42MPaで、橋梁用のゴム支承に用いられるように樹脂配合された高減衰ゴムを用いることとした。

供試体の寸法はいずれも同じであり、図-1に示すように幅100mm、長さ250mm、厚さ100mmである。供試体2はゴム単体からなるのに対して、供試体1、3は桁に対する緩衝装置の取り付けを考慮して片面に厚さ16mmの鋼板が加硫接着されている。したがって、供試体1と2はともに天然ゴムを用いた供試

表-1 供試体寸法と公称の物理的性質

項目		供試体 1	供試体 2	供試体 3
寸法	平面寸法 (mm)	250×100		
	厚さ (mm)	100		
物理的性質	ゴム材質	天然ゴム		高減衰ゴム
	25%ひずみ時弾性係数 (MPa)	0.43	1	0.42
	引張強さ (MPa)	22.7	14	14.3
	伸び (%)	730	550	753
	硬さ (Hs)	34	60	—
取り付け鋼板		有り	なし	有り

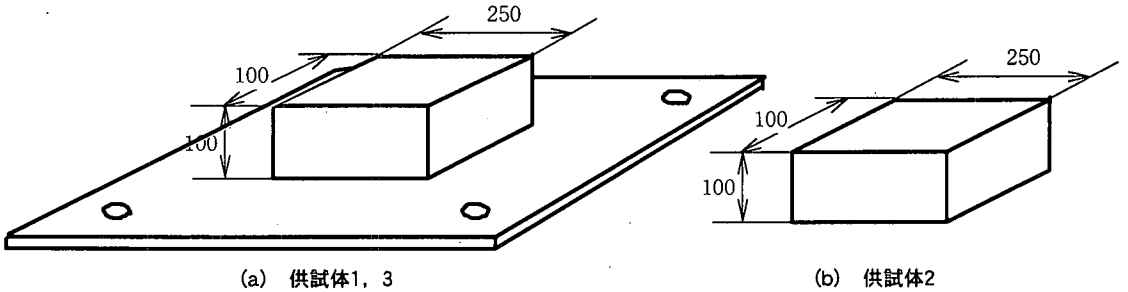
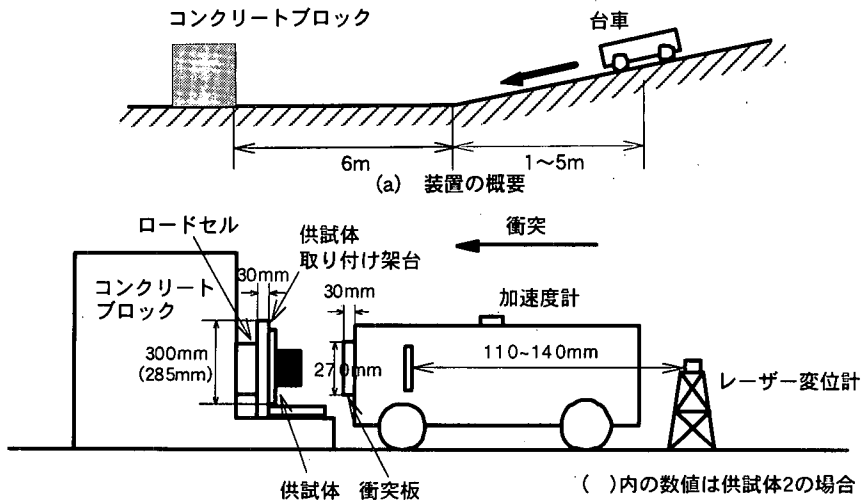


図-1 緩衝装置模型



(b) 衝突部の構成

図-2 装置の概要

体であるが、弾性係数が異なる他、取り付け鋼板の有り無しが異なっている。

(2) 実験方法及び実験条件

衝撃的にゴム製緩衝装置に大きな面圧を作用させるために、(社)日本建設機械化協会建設機械化研究所が所有する衝突実験装置を用いて衝突実験を行った。この装置は、図-2(a)に示すように、5度42

分38秒の角度で傾斜した斜面上を台車が滑り落ち、6mの水平区間を走行した後、図-2(b)に示すようにコンクリート製のブロックに取り付けられた緩衝装置に衝撃力を与えるようになっている。台車を滑り出させる斜面上の位置を変化させることにより、台車の速度をコントロールでき、緩衝装置に作用する衝撃力を変化させることができる。

台車には加速度計を取り付け、衝突時に台車に生

表-2 実験に用いた計測器の特性

計測器	製造メーカー・型名	応答周波数	固有周波数	応答時間
レーザー変位計	アンリツ(株)・KL137A	4kHz		0.3msec
加速度計	(株)東京測器研究所・AR-50TF	約240Hz	約410Hz	最大5msec
ロードセル	(株)東京測器研究所・CLP-200B	約3.5kHz	約7kHz	最大5msec

表-3 衝突実験の条件

実験ケース	供試体	台車重量 W_{SB} (kN)	衝突前の速度 v_1 (m/s)	衝突前の運動エネルギー E_1 (kJ)	実験実施年月日	実験時の温度(°C)	備考	
1	供試体 1	72.4	1.26	5.86	1998.9.14	31.0	6回繰り返し実験	
2		72.4	1.75	11.30	1998.9.14	27.5		
3		1	72.4	2.17	17.38	1998.9.17		26.0
2		72.4	2.45	22.15	1998.9.17	26.0		
3		72.4	2.35	20.38	1998.9.17	26.0		
4		72.4	2.51	23.25	1998.9.17	26.0		
5		72.4	2.54	23.81	1998.9.17	26.0		
6		72.4	2.48	22.69	1998.9.17	26.0		
4		141.3	1.24	11.08	1998.9.24	26.5		
5		141.3	1.72	21.31	1998.9.24	26.5		
6	供試体 2	71.6	1.40	7.15	1997.11.11	20.5	5回繰り返し実験	
7		71.6	1.75	11.18	1997.11.11	19.5		
8		1	71.6	2.40	21.02	1997.11.11		19.5~20.5
2		71.6	2.48	22.45	1997.11.11	19.5~20.5		
3		71.6	2.42	21.38	1997.11.11	19.5~20.5		
4		71.6	2.59	24.48	1997.11.11	19.5~20.5		
5		71.6	2.49	22.63	1997.11.11	19.5~20.5		
9		140.5	1.21	10.49	1997.11.19	16.0		
10		1	140.5	1.23	10.84	1997.11.19		14.0~15.5
2		140.5	1.79	22.95	1997.11.19	14.0~15.5		
11	供試体 3	72.4	1.16	4.97	1998.9.14	31.0	5回繰り返し実験	
12		72.4	1.77	11.56	1998.9.14	27.5		
13		1	72.4	2.63	25.52	1998.9.17		26.5
2		72.4	2.52	23.43	1998.9.17	26.5		
3		72.4	2.61	25.14	1998.9.17	26.5		
4		72.4	2.62	25.33	1998.9.17	26.5		
5		72.4	2.48	22.69	1998.9.17	26.5		
14		141.3	1.26	11.43	1998.9.24	26.5		
15		141.3	1.84	24.38	1998.9.24	26.0		

じた水平方向加速度を計測した。また、地上にレーザー変位計を固定し、台車に取り付けた反射板との間の相対変位を計測することにより衝突前～衝突後の全過程における台車の変位を測定した。これにより供試体の圧縮変位を求めることができる。さらに、変位を数値微分することにより、台車が供試体に衝突する直前や衝突後の速度を求めることができる。また、緩衝装置に作用した衝撃力は緩衝装置を取り付ける架台とコンクリートブロックの間にロードセルを設置して計測した。

実験に用いた計測センサーの応答特性を表-2に示す。応答時間とは、レーザー変位計の場合には、ステップ状に変化する動きを測定する際の測定値が

最終値の±10%以内に収まるまでの時間であり、また、ロードセルの場合には、受感部に荷重が作用した後、内部のひずみゲージが変形を感知するまでの時間である。また、固有周波数とはセンサーそのものの無負荷時における卓越周波数である。応答周波数は、正弦的に変化する定常な入力信号に対する出力信号の振幅比および位相差が一定の誤差範囲に収まる周波数領域であり、通常のセンサーでは固有周波数の1/2程度と言われている。

ここで、今回の実験に用いたレーザー変位計の応答時間は0.3msec、ロードセルの応答時間は最大5msecであり、両者の間には最大4.7msecの差がある。このため、ロードセルから測定した荷重とレ

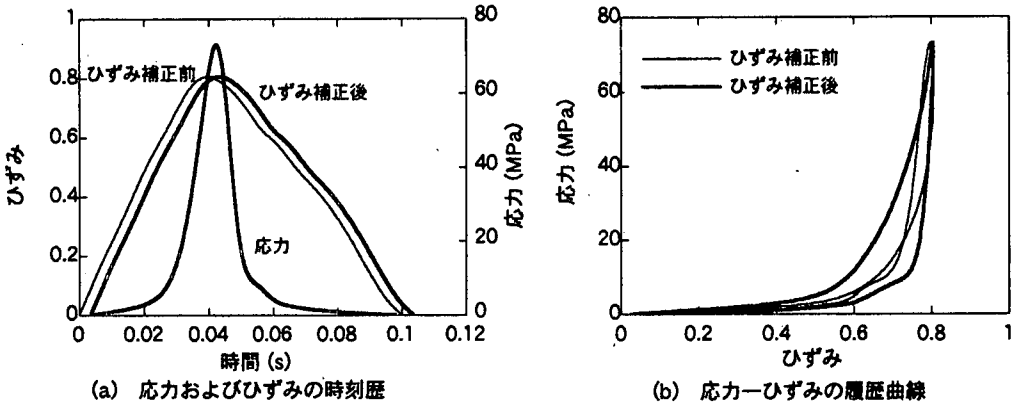


図-3 応力とひずみの時間差を補正する効果 (ケース8-1の場合)

ザー変位計から測定した緩衝装置の変位には時間ずれが生じ、このため履歴曲線が反転する等の問題が生じた。同様に、加速度計もひずみゲージ式であり、応答時間が表-2に示すように最大5msec程度となるため、レーザー変位計との間には応答時間の差に起因する時間ずれが生じる。このため、後述するようにひずみと応力の時間差を補正することとした。速度と変位はサンプリングタイム0.2msecでデータレコーダに収録した。また、変位、加速度、荷重のいずれに対しても100Hz以上の高周波数成分をフィルタアウトしている。

緩衝装置と取り付け架台は図-2(b)の通りである。供試体2の場合には両面テープによって、また、供試体1および3の場合には取り付け鋼板を架台にねじで固定した。取り付け架台と台車の衝突板はともに厚さが30mmの鋼材でできており、剛体とみなすことができる。台車が供試体に衝突すると、供試体は圧縮力を受けて変形するが、台車の先端に取り付けた供試体との衝突面や架台の大きさは、ゴムがつぶれても取り付け架台から膨出せず、かつ側面(自由面)が拘束されないように設計した。

実験は、3種類の緩衝装置に対して、衝突速度を1.25、1.77、2.50m/sの3通りに変化させると同時に衝突エネルギーを変化させる目的で台車重量を72.4kNと141.3kNの2種類に変化させ、表-3に示すように合計15ケースに対して行った。ここで、衝突速度は兵庫県南部地震クラスの地震によって都市高架橋に生じる応答速度を想定して定めたものである。兵庫県南部地震では最大で0.87g程度の地盤加速度が観測され、応答スペクトルから推定すると、固有周期0.5~1秒程度の橋梁に生じる応答速度は2m/s程度となる。ただし、同一の供試体に対して繰り返して衝撃力を与えた場合の影響を検討するため、実験

3では6回、実験8、13では各5回、実験10では2回、繰り返して実験を行った。地震時には緩衝装置に連続して衝突力が作用することを考慮すると、衝突実験ではできるだけ短い時間間隔で衝突を繰り返したかったが、1回衝突実験を行った後に台車を斜面の所定の位置まで引き上げるためには約10分を要するため、実験のくり返し間隔は約10分である。なお、供試体2では台車の重量が71.6kN、140.5kNと実験1や3の場合に比較して0.8kNだけ軽くなっているが、これはこのケースでは衝突部を補強するための鋼材(重さ0.8kN)が取り付けられていなかったためである。

実験は供試体2に対しては1997年11月に、また供試体1および3に対しては1998年9月に行った。実験時の気温は15.5~31℃であり、常温の範囲の実験とみなすことができる。

3. 緩衝装置の応力-ひずみ関係とその補正

衝突実験から求めた緩衝装置のひずみと圧縮応力の履歴の一例を図-3に示す。図中には、後述するひずみと応力の位相を補正した結果も比較のために示している。図-3(a)では衝突力が作用し始めた時刻を時間軸の0としている。衝突力が作用し始めるとともに圧縮ひずみが増加し始めるが、図-3(b)の応力とひずみの履歴曲線を見ると載荷履歴と除荷履歴が途中で反転している。これは、図-3(a)の応力とひずみの時刻歴でも明らかであり、緩衝装置に圧縮力が作用し始める前に緩衝装置にひずみが生じ始めている。

この原因としてはゴム内を伝播する縦波の影響も考えられるが、縦波がゴム内を伝播するのに要する

表-4 最適な $\Delta\tilde{E}/\Delta E$ を与える τ とそのときの $\Delta\tilde{E}/\Delta E$

実験 ケース	補正時間 τ (msec)	吸収 エネルギー $\Delta\tilde{E}$ (kJ)	損失 エネルギー ΔE (kJ)	$\Delta\tilde{E}/\Delta E$	
1	4.8	1.93	1.94	1.01	
2	3.4	4.56	4.38	0.96	
3	1	2.8	11.78	12.15	1.03
	2	2.8	15.33	15.91	1.04
	3	1.4	6.88	7.20	1.05
	4	1.4	8.05	7.59	0.94
	5	1.6	10.22	10.63	1.04
	6	2.0	11.38	11.78	1.03
4	4.2	4.58	4.57	1.00	
5	4.2	12.10	12.11	1.00	
6	1.0	3.67	3.65	0.99	
7	0.2	5.51	5.66	1.03	
8	1	3.6	14.19	14.07	0.99
	2	3.2	12.63	12.99	1.03
	3	2.4	8.59	8.75	1.02
	4	3.2	13.53	13.43	0.99
	5	1.65	4.55	4.48	0.99
9	3.8	5.06	5.20	1.03	
10	1	5.0	6.11	6.26	1.03
	2	5.0	17.63	17.68	1.00
11	3.8	4.62	4.61	1.00	
12	4.4	10.78	10.71	0.99	
13	1	3.0	24.06	23.72	0.99
	2	2.2	20.85	21.19	1.02
	3	2.2	23.94	23.63	0.99
	4	1.8	21.39	21.86	1.02
	5	2.0	20.27	20.33	1.00
14	2.6	10.31	10.34	1.00	
15	4.6	22.88	22.79	1.00	

時間は0.2msec程度と極めて短いことから、この影響は顕著なものではないと考えられる。したがって、前述したようにロードセルとレーザー変位計の位相差に起因するとみるのが妥当と考えられる。短時間の応答が問題となるため、わずかな応答速度の差がこうした誤差を生じさせたと考えられる。このため、ここでは衝突時の台車の損失エネルギー ΔE は供試体に吸収されると仮定し、供試体の吸収エネルギー $\Delta\tilde{E}$ が衝突時の台車の損失エネルギー ΔE と等しくなるように荷重と変位の位相差を補正することとした。

衝突時の台車の損失エネルギー ΔE は次式で求められる。

$$\Delta E = E_1 - E_2 \quad (1)$$

ここに、 E_1 、 E_2 は衝突前、衝突後の運動エネルギー

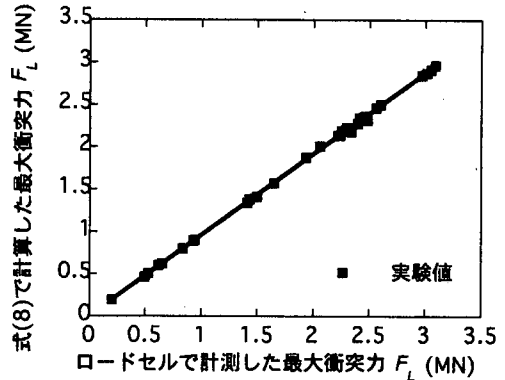


図-4 ロードセルで測定した最大衝突力の検証

一であり、それぞれ次式で求められる。

$$E_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{W_{SB}}{g} \cdot v_1^2 \quad (2)$$

$$E_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{W_{SB}}{g} \cdot v_2^2 \quad (3)$$

ここに、 v_1 : 衝突前の台車の速度、 v_2 : 衝突後の台車の速度、 W_{SB}/g : 台車の質量である。

一方、供試体の吸収エネルギー $\Delta\tilde{E}$ は時刻 t の応力を $\sigma(t)$ 、ひずみを $\varepsilon(t)$ とすれば、

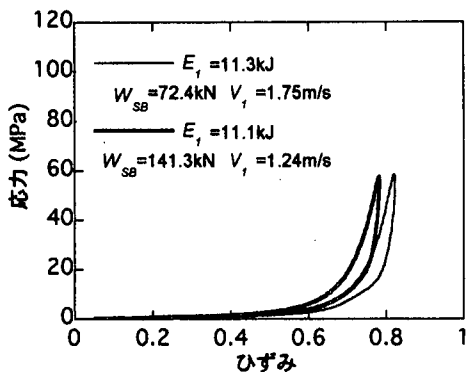
$$\Delta\tilde{E} = \int_0^{T_D} \sigma(t) d\varepsilon(t) \quad (4)$$

ここで、 T_D は衝突継続時間である。衝突継続時間 T_D は次式により求めた。

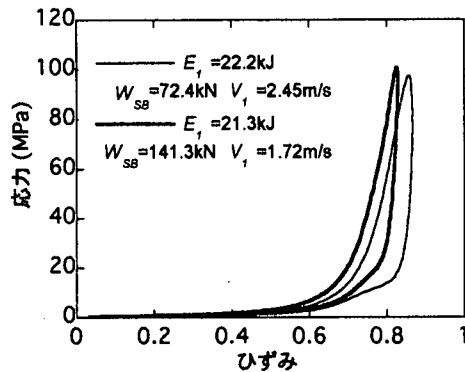
$$T_D = t_2 - t_1 \quad (5)$$

ここで、 t_1 : 台車が緩衝装置と接触し始めた時刻、 t_2 : 台車が緩衝装置と接触後、両者が接触し始めた位置までもどった時刻である。時刻 t_1 、 t_2 は、図-3(a)に示すように本来はロードセルの応答から求めるのが一番良いが、前述したようにロードセルとレーザー変位計の間には応答速度の差があるため、レーザー変位計の波形から求めたものである。なお、衝突に伴い供試体にはわずかな残留変位が生じるため、上述したように t_2 を定義すると、残留変位に相当するだけ衝突継続時間を長く評価するが、これによる誤差はわずかである。

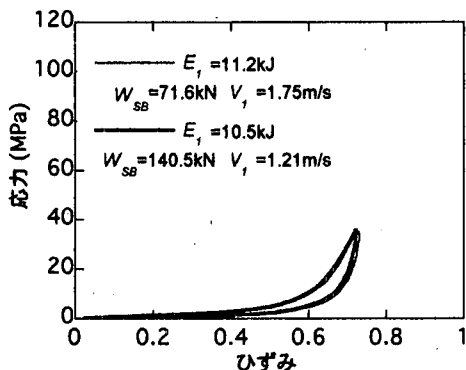
上述したようにレーザー変位計とロードセルの応答速度の違いによりひずみ $\varepsilon(t)$ が応力 $\sigma(t)$ に対して τ だけ時間が進んでいると考え、このときの



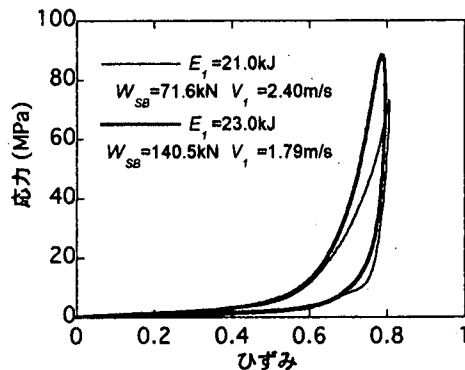
(a) 供試体1



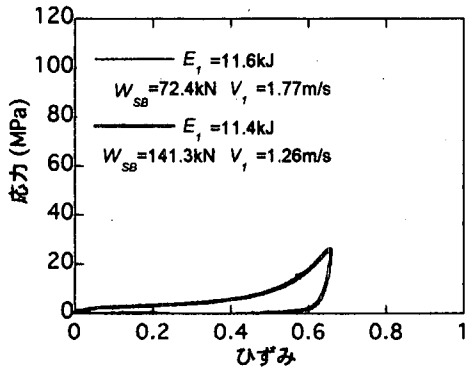
(a) 供試体1



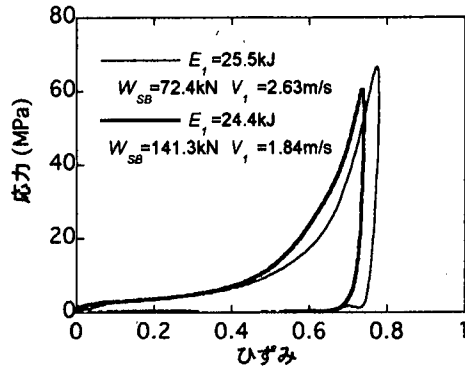
(b) 供試体2



(b) 供試体2



(c) 供試体3



(c) 供試体3

(1) $E_1 = 10.5 \sim 11.6 \text{kJ}$ の場合

(2) $E_1 = 21.0 \sim 25.5 \text{kJ}$ の場合

図-5 ほぼ同じ衝突エネルギーを受けた場合の履歴特性の比較

供試体の吸収エネルギー $\Delta \tilde{E}(\tau)$ は、時間 τ だけひずみを遅らせて以下のように求めることができる。

$$\Delta \tilde{E}(\tau) = \int_0^{T_D} \sigma(t) d\epsilon(t + \tau) \quad (6)$$

従って、 τ をいろいろ変化させて、

$$|\Delta \tilde{E}(\tau) - \Delta E| \rightarrow \min \quad (7)$$

となる τ を求めることとした。ここでは、前述したようにサンプリング時間が 0.2msec であることから、 τ は 0.2msec 刻みに変化させることとした。この結果を表-4 に示す。位相差として補正すべき時間差

は 0.2~4.8msec であり、これにより $\Delta \bar{E} / \Delta E$ は 1.0 ± 0.05 に収まる。

このような補正を施すことにより、どのように応力-ひずみの履歴曲線が改善されたかを示した一例を前出の図-3 に示している。位相を補正することにより履歴曲線が常識的な結果となることがわかる。ただし、位相差に関してはこのように補正することによる精度が厳密にどの程度であるかについては今回の検討ではわからない。今後、履歴曲線の精度に関しては別途正確に再検討する必要がある。以下では、このように補正した結果をもとに解析を行うこととする。

衝撃的に作用する衝突力をロードセルによって測定することは本来なかなか難しいことである。このため、ロードセルによって測定した衝突力の精度を検証するために、台車の加速度から推定される衝突力との比較検討を行った。衝突時の台車の加速度を a_{SB} とすると、緩衝装置に作用する最大衝突力は次式により推定することができる。

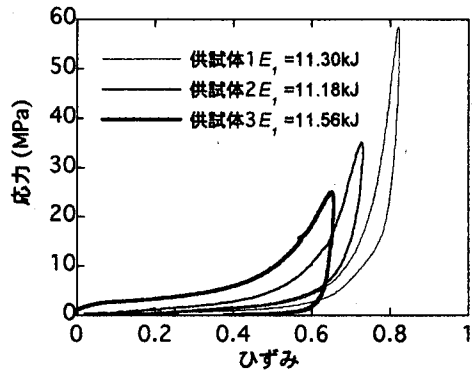
$$F_L = \frac{W_{SB}}{g} \cdot a_{SB} \quad (8)$$

式(8)より求めた最大衝突力とロードセルで計測した最大衝突力との関係を示すと図-4 のようになる。両者はよく一致しており、ロードセルによって測定した衝突力は信頼できると考えて良い。また、衝突力は台車の質量と加速度から精度よく推定することが可能である。

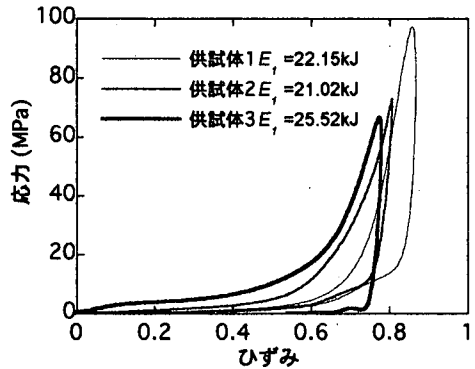
4. 緩衝装置の力学的特性

(1) 応力-ひずみの履歴特性

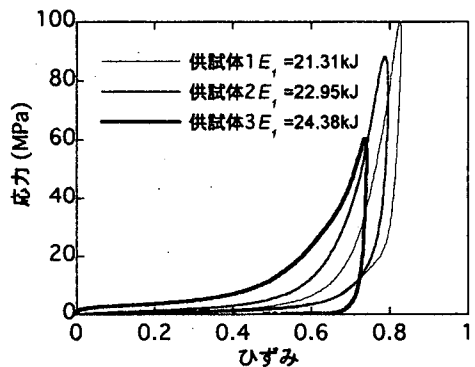
供試体1~3ごとに、台車重量 W_{SB} や衝突前の速度 v_1 はいろいろ異なっているが、式(2)による衝突前の衝突エネルギー E_1 がほぼ同じであった载荷実験結果に対する応力~ひずみの関係を示した結果が図-5である。圧縮ひずみはいずれも0.6以上、応力は25~100MPaと極めて大きい。同一の供試体であれば、台車重量や衝突速度が異なっても衝突エネルギーが同じであれば、履歴特性もほぼ同じであることがわかる。供試体1の場合を例に取ると、各2回の実験結果を示しているが、いずれの場合も、衝突エネルギーが $E_1=11.1\sim 11.3\text{kJ}$ の場合には圧縮ひずみは0.75~0.8、圧縮応力は60MPa程度であり、衝突エネルギーが $E_1=21.3\sim 22.2\text{kJ}$ となると圧縮ひずみは0.8~0.95、圧縮応力は100MPa程度となる。



(a) 衝突前の運動エネルギー $E_1=11.2\sim 11.6\text{kJ}$ の場合



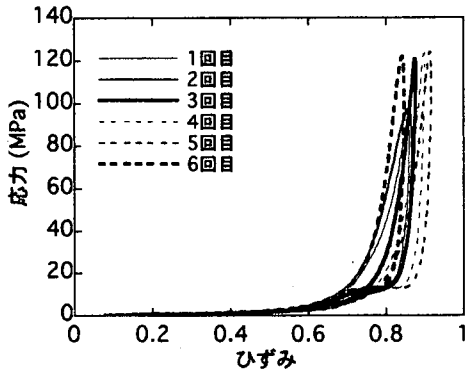
(b) 衝突前の運動エネルギー $E_1=21\sim 25.5\text{kJ}$ の場合



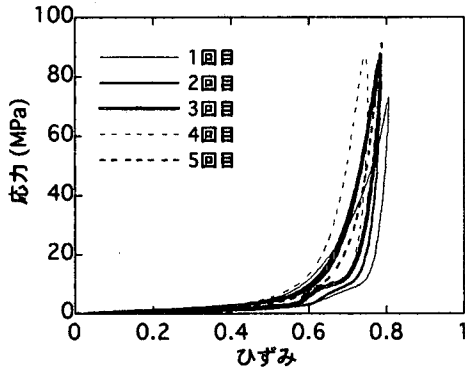
(c) 衝突前の運動エネルギー $E_1=21.3\sim 24.4\text{kJ}$ の場合

図-6 ほぼ同じ衝突エネルギーを受けた場合の供試体1~3の履歴特性の比較

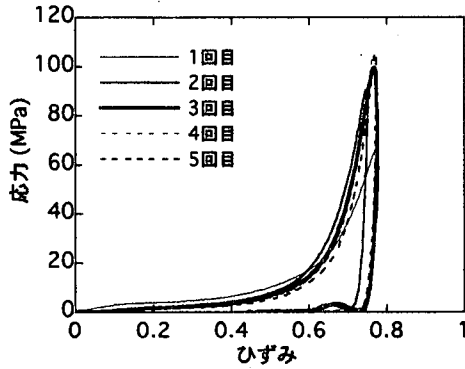
また、天然ゴムを用いた供試体1および2の場合には、除荷履歴は载荷履歴とあまり変わらず履歴吸収エネルギーが小さいが、高減衰ゴムを用いた供試体3の場合には、除荷履歴は最大応力点からまっすぐ下がった後、ほぼ応力度ゼロの線に沿ってひずみが減少し、大きな履歴吸収エネルギーを与えることがわかる。ゴムの減衰は主として内部摩擦によって生じる。内部摩擦はゴム分子相互間やゴム分子-充填材



(a) 供試体1



(b) 供試体2

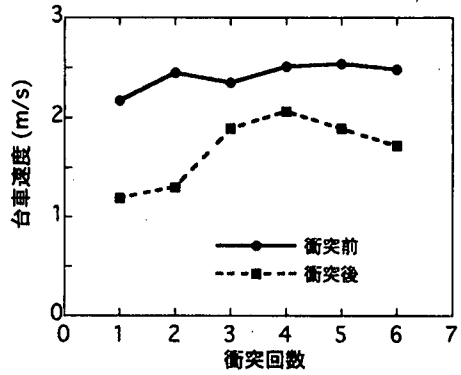


(c) 供試体3

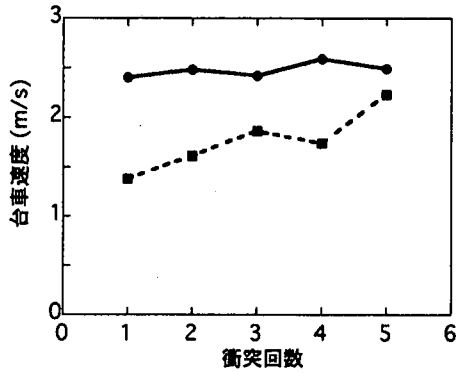
図-7 繰り返して衝突させた場合の履歴曲線の比較

間の相互作用によるものである。天然ゴムでは弾性係数を大きくするためには一般に充填材としてカーボンが多量に配合される。高減衰ゴムには樹脂も配合されており、充填材の量はさらに多くなる。充填材の量が多いほど、減衰も大きくなるため、このような、損失エネルギーの大きさに違いが生じる。

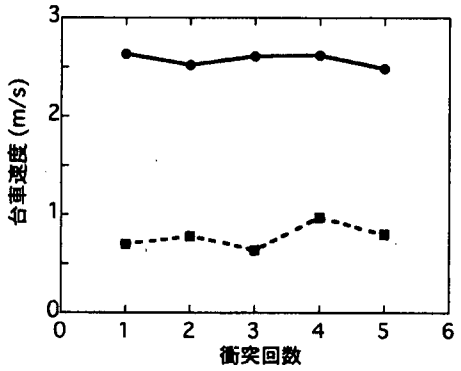
衝突前の運動エネルギーがほぼ同じ場合の履歴特性を供試体1~3間で比較した結果が図-6である。これによれば、同じ衝突エネルギーが作用しても緩衝装置の履歴には大きな違いがあり、ひずみ量は供試体3、供試体2、供試体1の順に大きくなる。これ



(a) 供試体1



(b) 供試体2



(c) 供試体3

図-8 衝突回数と衝突前後の台車速度の関係

は、供試体3では履歴吸収エネルギーが大きいため供試体1や2に比較してひずみが小さくなるためである。また、供試体2は供試体1よりも25%ひずみ時の弾性係数が約2.3倍大きいためである。

(2) 繰り返して衝突させた場合の影響

ケース3, 8, 13では同一供試体に対して連続5~6回繰り返して衝突実験を行った。これによって得られた緩衝装置の応力-ひずみの履歴特性を図-7に示す。ただし、図中のひずみは処女載荷前の寸法に対して求めたもので、残留ひずみは考慮していな

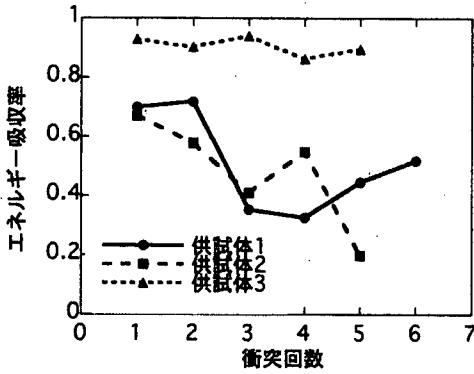


図-9 衝突回数とエネルギー吸収率 γ の関係

い。いずれの供試体も1回目の衝突時の応力は2回目以降よりも小さくなっている。

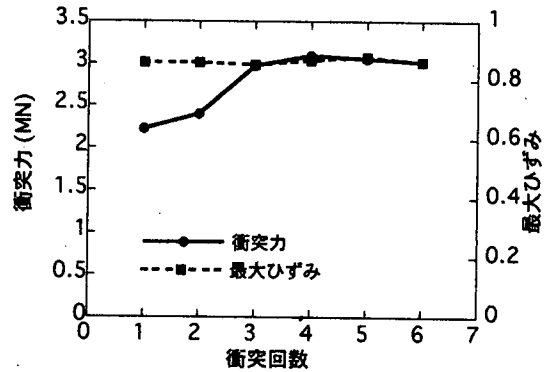
台車の衝突前および衝突後の速度が衝突の繰り返しによってどのように変化したかを示した結果が図-8である。衝突前の速度はほぼ一定にコントロールされている。この条件下で、供試体1では3回目までの衝突では衝突回数の増加とともに衝突後の速度が大きくなるが、その後は衝突後の速度はほぼ一定となる。これに対して、供試体2では衝突回数が増加するにつれて衝突後の速度は徐々に増加し、5回目の衝突では衝突前の速度とあまり変わらないほどになる。天然ゴムを用いた場合には、衝突を繰り返すことにより、徐々にゴムが硬化していくことを示している。一方、供試体3では衝突後の速度は衝突回数によってほとんど変わらず、また衝突前の速度の1/2.5以下と供試体1、2と比較すると著者に小さい。これは、前述したように、供試体3では高減衰ゴムを用いているため、エネルギー吸収が大きいためである。

緩衝装置としては、エネルギー吸収率が大きいことが望ましい⁷⁾。このため、ここではエネルギー吸収率を次式のように定義する。

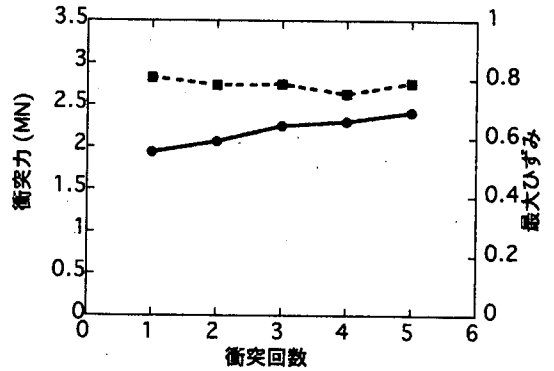
$$\gamma = \frac{\Delta E}{E_1} \quad (9)$$

ここで、 ΔE 、 E_1 は式(1)、(2)により与えられる衝突時の台車の損失エネルギー、衝突前の台車の運動エネルギーである。

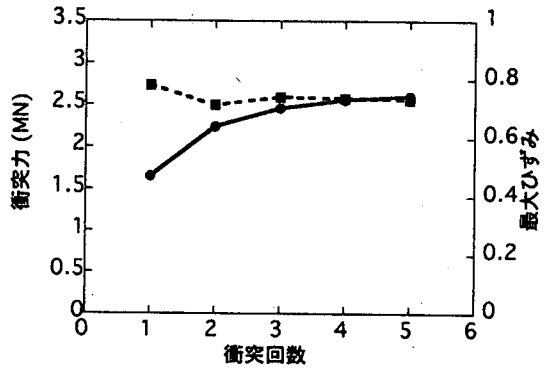
図-9は式(9)によるエネルギー吸収率が衝突回数によってどのように変化するかを示したものである。供試体1では、最初の衝突ではエネルギー吸収率が約70%であるが、3回目以降の衝突になるとエネルギー吸収率は約40%となる。これに対して供試



(a) 供試体1



(b) 供試体2



(c) 供試体3

図-10 衝突回数と衝突力 F_L 、最大ひずみの関係

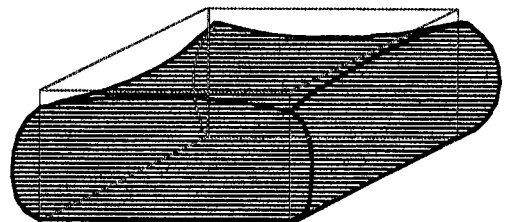
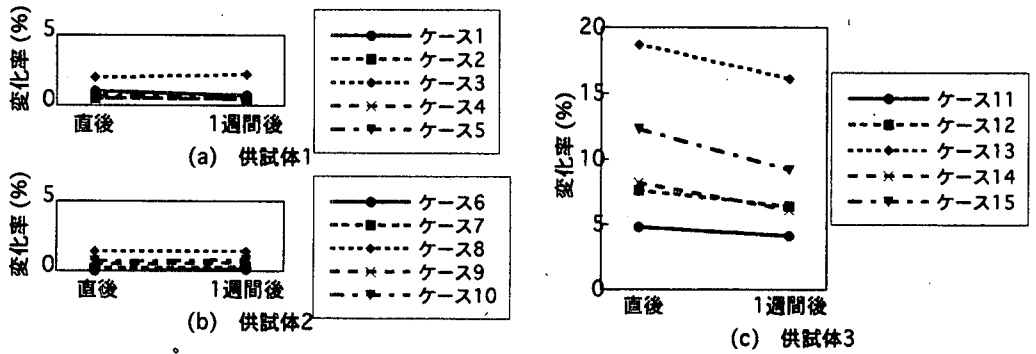
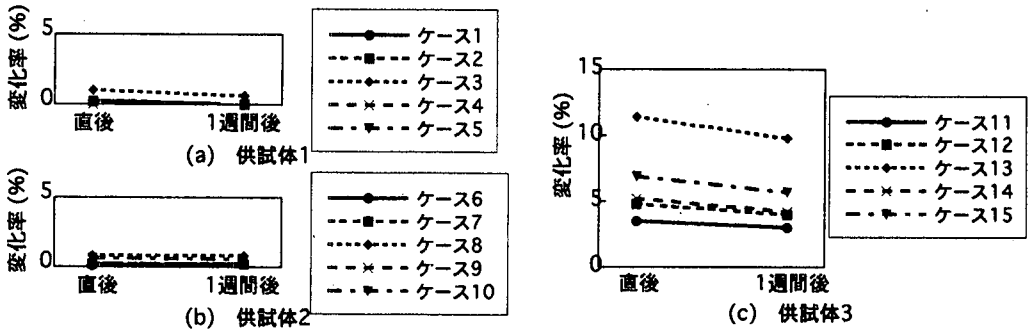


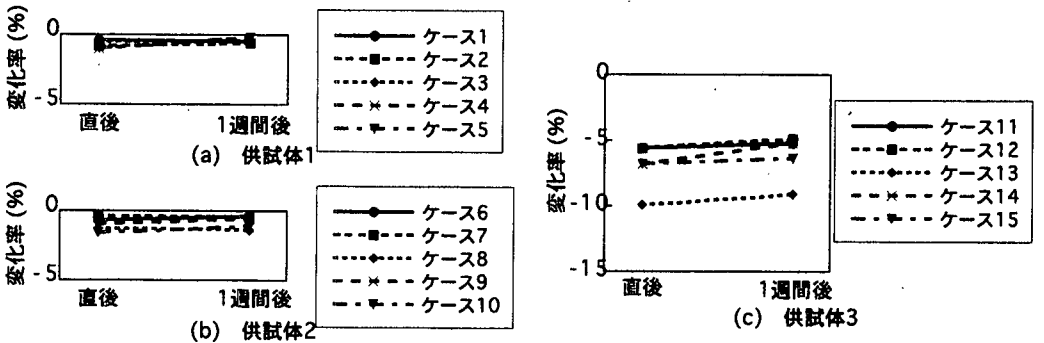
図-11 衝突実験後の緩衝装置の変形



(1) 長さの変化率



(2) 幅の変化率



(3) 厚さの変化率

図-12 衝突実験後の緩衝装置の寸法の変化率

体2では、最初の衝突時の約65%から5回目の衝突時の約20%まで、吸収エネルギーは衝突回数が増大するにつれて徐々に減少する。これに対して、供試体3では、エネルギー吸収率は衝突回数によってほとんど変化せず約90%前後と高い値を保っている。天然ゴムと比較すると高減衰ゴムはエネルギー吸収性能が優れており、かつエネルギー吸収率は繰り返し衝突回数の依存性が少ないことを示している。

図-10は、衝突が繰り返すことによって衝突力と緩衝装置に生じた最大ひずみがどのように変化するかを示した結果である。図-7と同様にここでは処女

載荷前の寸法を基準にしたひずみを示しており、残留ひずみは考慮していない。これによれば、供試体1では3回目の衝突までは衝突力は増加していくが、最大ひずみはほぼ一定になっている。図-6に示したように、最初の衝突によって緩衝装置に生じる変形は供試体1、供試体2、供試体3の順で大きい。この関係は衝突回数が増加しても基本的に変化しない。衝突を繰り返すにつれて、緩衝装置に生じる最大ひずみは徐々に小さくなる。この傾向は特に供試体2、3で著しい。この理由は、供試体2では取り付け鋼板がないため、また、供試体3では高減衰ゴムを使用

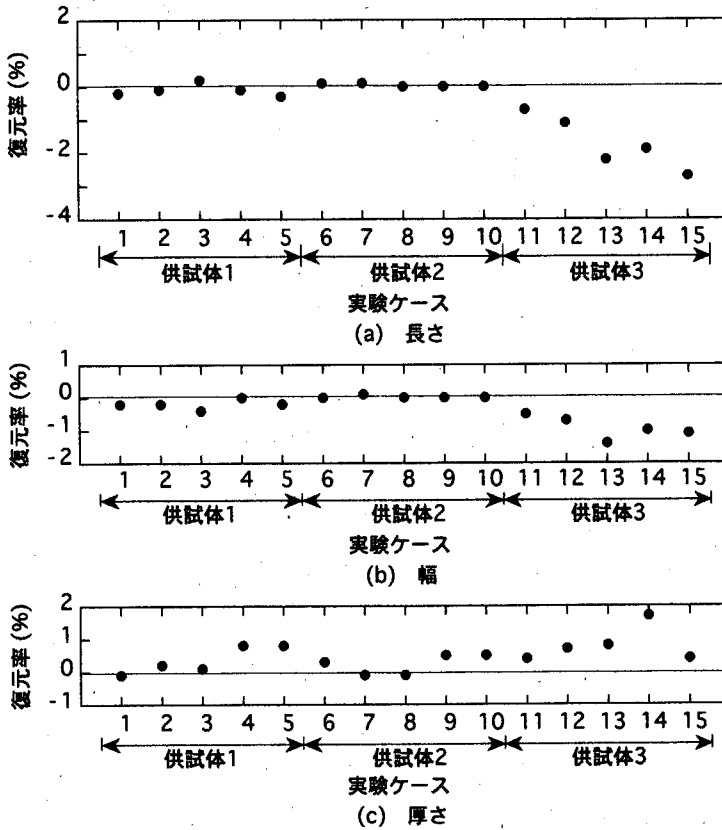


図-13 実験1週間後の緩衝装置の寸法の復元率

しているため、それぞれ残留変形が累積しやすいことによると考えられる。取り付け鋼板がない場合にはゴムの形状係数が小さくなり、変形が生じやすい。また、高減衰ゴムには前述したように充填材が多く配合されており、ゴムの内部摩擦が大きくなるため、残留変形が生じやすい。

一方、衝突力は衝突回数の増加につれて徐々に大きくなる。これは、残留変形によりゴムが硬化したためである。

(3) 衝突後に緩衝装置に残る残留変位

衝撃実験後には、緩衝装置は図-11に示すように受衝面は凹型に、側面は凸型に変形した。緩衝装置としては、衝突力が加わったあとにはできるだけ残留変形が残らないことが望ましい。このため、実験終了直後と実験から1週間後の供試体の寸法を測定した。これらの変化率 η を次式のように定義した。

$$\eta = \frac{l_B - l_A}{l_A} \times 100 (\%) \quad (10)$$

ここで、 l_A ：衝突実験前の供試体の平均寸法、

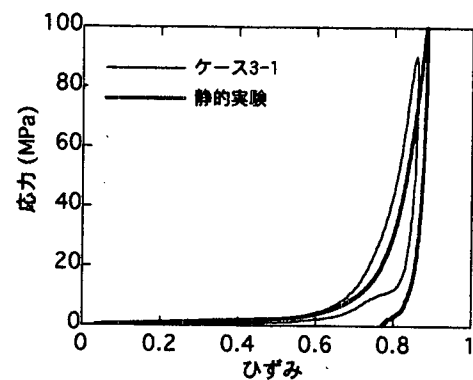
l_B ：衝突実験後の供試体の平均寸法である。

式(10)より求めた実験後の供試体の平面寸法および高さの変化率（载荷による変化量）を図-12に示す。これによれば、厚さの変化率 η はマイナスであり、実験後には実験前に比較して厚さが減少しているのに対して、長さ、幅の変化率はともにプラスであり、実験後には実験前に比較して長さと同幅は増加していることを示している。同一実験条件では供試体3の変化率は供試体1、2と比較して約10倍大きくなっており、高減衰ゴムの残留変形が大きいことがわかる。

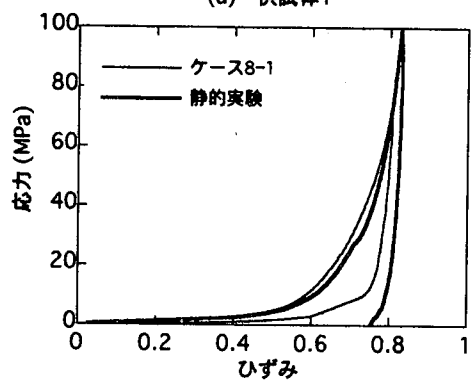
実験後1週間の間に、どれだけ供試体の寸法がもともどったかを示すために载荷後の復元率 ξ を次式のように定義する。

$$\xi = \frac{l_{1week} - l_{EA}}{l_{EA}} \times 100 (\%) \quad (11)$$

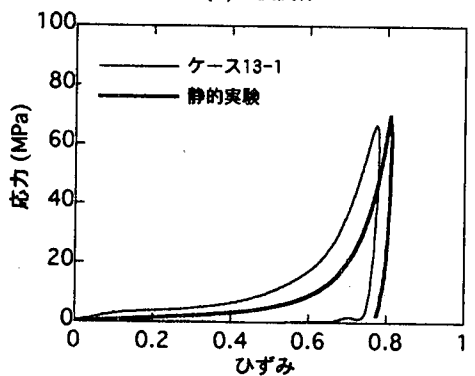
ここで、 l_{EA} ：実験直後の供試体の平均寸法、 l_{1week} ：1週間後の供試体の平均寸法である。载荷後の復元率 ξ を長さ、幅、厚さ別に示すと図-13の



(a) 供試体1



(b) 供試体2



(c) 供試体3

図-14 静的実験との比較

ようになる。天然ゴム系の供試体 1, 2 の復元率は小さいのに対して、高減衰ゴム系の供試体 3 の復元率は大きい。ただし、高減衰ゴムは天然ゴムと比較すると復元率は大きい、もともとの残留変形が大きい、見た目には実験後に生じた変形はほとんど変化しなかった。このように高減衰ゴムを用いて緩衝装置を作成すると衝撃を受けた後の残留変形は大きく残ることになるが、これが緩衝装置としての性能に問題を与えるか否かは使用条件によって異

なると考えられる。

(4) 静的載荷実験との比較

静的載荷実験との比較を実験ケース 3-1, 8-1, 13-1 に対して示すと図-14 のようになる。静的載荷実験の場合には載荷および除荷の 1 サイクルを供試体 1~3 に対して 900 秒~1300 秒で行ったため、平均の載荷速度は表-3 に示す衝突実験における衝突前速度の 0.005% と極めて小さい。

図-14 によれば、いずれの供試体においても同一ひずみにおける応力は衝突実験の場合の方が大きくなっている。特に、高減衰ゴムである供試体 3 の場合は顕著である。また、除荷時の剛性は衝突実験よりも静的実験の場合の方が大きく、結果として、応力~ひずみの履歴曲線は静的実験の方が太った形状となる。

5. 緩衝装置の力学的特性の定量化

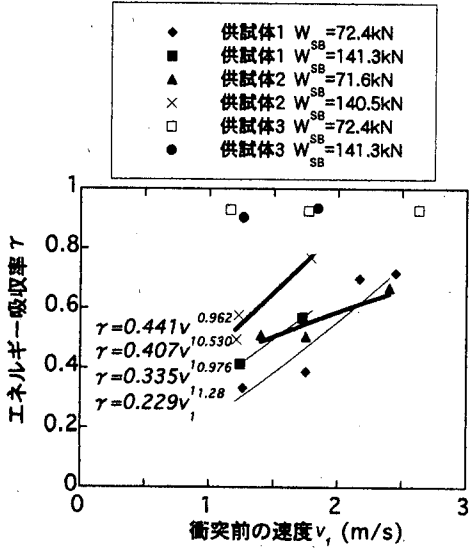
(1) エネルギー吸収率

動的解析を行えば、衝突前の桁の速度を求めることができ、したがって緩衝装置に作用する衝突エネルギーを推定することができる。したがって、緩衝装置を設計しようとする、緩衝装置のエネルギー吸収率や衝突力がこうした桁の衝突速度や桁から作用する衝突エネルギーによってどの程度となるかを推定しなければならない。

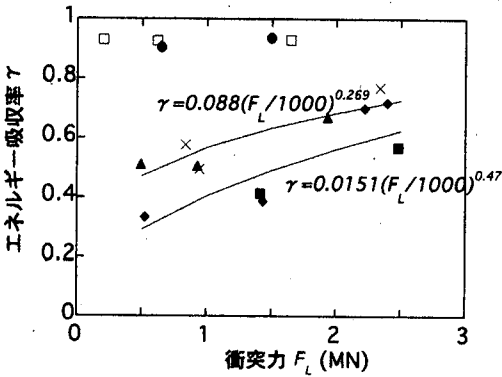
実験結果を緩衝装置のエネルギー吸収率が衝突前の速度 v_1 (m/s) や運動エネルギー E_1 (kJ)、衝突力 F_L (MN) によってどのように変化するかを示した結果が図-15 である。衝突力は衝突の結果として生じる物理量であり、エネルギー吸収率とは全く独立ではないが、両者がどのような関係となるかは関心のあるところであり、図-15(b)にはこれを示したものである。天然ゴムを用いた供試体 1, 2 と高減衰ゴムを用いた供試体 3 には大きな違いがあり、供試体 3 では衝突前の速度 v_1 や衝突エネルギー E_1 、さらには衝突力 F_L によらずエネルギー吸収率はおおむね以下のように与えられる。

$$\gamma = 0.92 \quad (12)$$

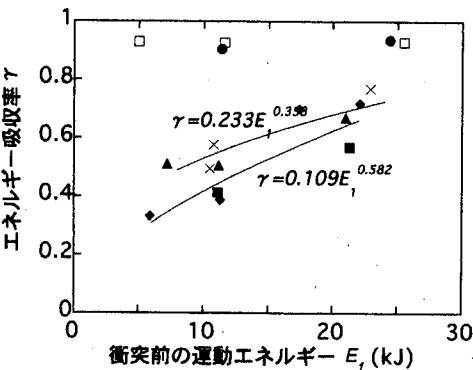
これに対して、供試体 1 および 2 ではエネルギー吸収率 γ はいろいろな条件で異なり、たとえば衝突前の速度 v_1 (m/s) との関係をも最小自乗近似すると、次式のようになる。



(a) 衝突前の速度 v_1 の影響



(b) 衝突力 F_L の影響



(c) 衝突前の運動エネルギー E_1 の影響

図-15 緩衝装置のエネルギー吸収率に与える影響

供試体 1

$$\gamma = \begin{cases} 0.229 \cdot v_1^{1.28} & (W_{SB} = 72.4\text{kN}) \\ 0.335 \cdot v_1^{0.976} & (W_{SB} = 141.3\text{kN}) \end{cases} \quad (13)$$

供試体 2

$$\gamma = \begin{cases} 0.407 \cdot v_1^{0.530} & (W_{SB} = 71.6\text{kN}) \\ 0.441 \cdot v_1^{0.962} & (W_{SB} = 140.5\text{kN}) \end{cases} \quad (14)$$

図-15(a)には式(13), (14)による関係を示しているが, 両式が実験結果の特徴をよく表していることが分かる。式(13), (14)によれば, 供試体1や2では台車重量 W_{SB} が大きいほど, また, 衝突速度 v_1 が大きいほどエネルギー吸収率 γ は大きくなる。

また, エネルギー吸収率 γ は衝突力 F_L (MN)や衝突エネルギー E_1 (kJ)ともよい関係があり, これを最小自乗近似すると次のようになる。

供試体 1

$$\gamma = 0.0151 \left(\frac{F_L}{1000} \right)^{0.476} \quad (15)$$

供試体 2

$$\gamma = 0.0885 \left(\frac{F_L}{1000} \right)^{0.269} \quad (16)$$

供試体 1

$$\gamma = 0.109 E_1^{0.582} \quad (17)$$

供試体 2

$$\gamma = 0.233 E_1^{0.358} \quad (18)$$

図-15(b), (c)には式(15)~式(18)の結果も示している。これらの式は供試体1, 2のエネルギー吸収率をよく表している。

(2) 衝突力

衝突力 F_L (MN)が衝突前の台車の速度 v_1 (m/s), 衝突前の運動エネルギー E_1 (kJ), 損失エネルギー ΔE (kJ)によってどのように変化するかを示した結果が図-16である。これらと衝突力との間には良い相関があり, まず, F_L (MN)と v_1 (m/s)の関係を最小自乗近似すると次のようになる。

供試体 1

$$F_L = \begin{cases} 0.333 \cdot v_1^{2.35} & (W_{SB} = 72.4\text{kN}) \\ 0.976 \cdot v_1^{1.72} & (W_{SB} = 141.3\text{kN}) \end{cases} \quad (19)$$

供試体 2

$$F_L = \begin{cases} 0.217 \cdot v_1^{2.25} & (W_{SB} = 71.6\text{kN}) \\ 0.541 \cdot v_1^{2.51} & (W_{SB} = 140.5\text{kN}) \end{cases} \quad (20)$$

供試体 3

$$F_L = \begin{cases} 0.140 \cdot v_1^{2.57} & (W_{SB} = 72.4\text{kN}) \\ 0.390 \cdot v_1^{2.21} & (W_{SB} = 141.3\text{kN}) \end{cases} \quad (21)$$

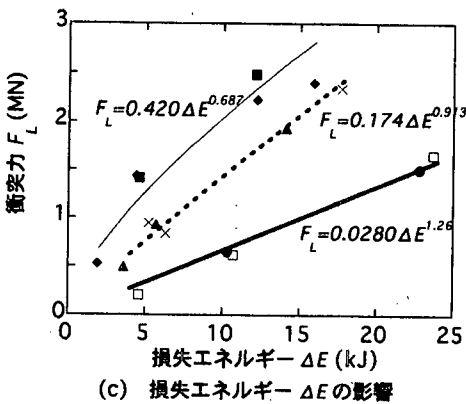
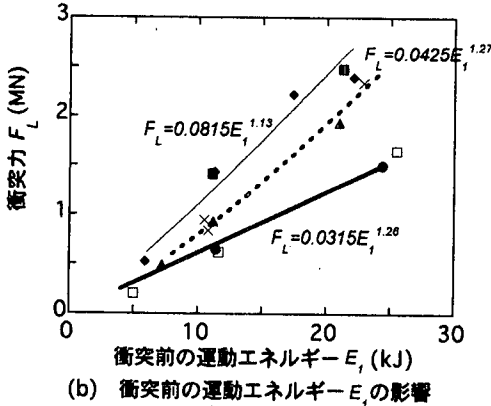
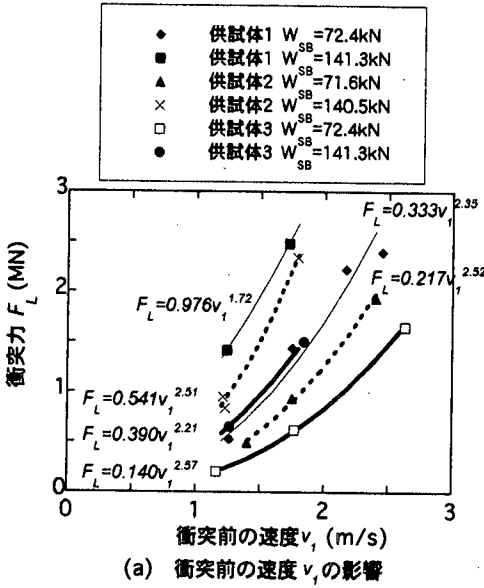
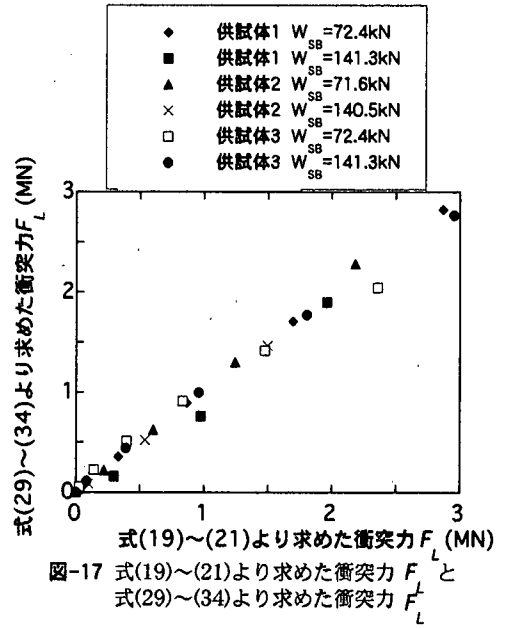


図-16 緩衝装置の衝突力に与える影響

図-16(a)には式(19)~(21)による衝突力を示しているが、いずれもよく実験結果の特徴を表しており、供試体1~3のいずれにおいても、衝突速度の約2乗に比例して衝突力が増加することが分かる。



また、衝突力(MN)と衝突前の運動エネルギー E_1 (kJ)、損失エネルギー ΔE (kJ)の関係を求めると、次のようになる。

供試体1 $F_L = 0.0815 \cdot E_1^{1.13}$ (22)

供試体2 $F_L = 0.0425 \cdot E_1^{1.27}$ (23)

供試体3 $F_L = 0.0315 \cdot E_1^{1.26}$ (24)

供試体1 $F_L = 0.420 \cdot \Delta E^{0.687}$ (25)

供試体2 $F_L = 0.174 \cdot \Delta E^{0.913}$ (26)

供試体3 $F_L = 0.0280 \cdot \Delta E^{1.26}$ (27)

図-16(b), (c)には式(22)~(27)による衝突力を示している。

式(22)~(24)による衝突力の精度を検討するために、これらを式(19)~(21)と比較してみよう。まず、衝突前の運動エネルギー E_1 は式(2)で与えられるから、台車重量が72.4kN、141.3kNの場合には E_1 は次のようになる。

$$E_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{W_{SB}}{g} \cdot v_1^2 = \begin{cases} \frac{1}{2} \cdot \frac{72.4}{9.8} \cdot v_1^2 = 3.69v_1^2 \\ \frac{1}{2} \cdot \frac{141.3}{9.8} \cdot v_1^2 = 7.21v_1^2 \end{cases} \quad (28)$$

これを式(22)に代入すると、供試体1の場合には衝突力は次のようになる。

$$\begin{aligned} & \underline{W_{SB}=72.4\text{kNの場合}} \\ & F_L = 0.0815 \times (3.69 \cdot v_1^2)^{1.13} = 0.356 \cdot v_1^{2.26} \quad (29) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \underline{W_{SB}=141.3\text{kNの場合}} \\ & F_L = 0.0815 \times (7.21 \cdot v_1^2)^{1.13} = 0.760 \cdot v_1^{2.26} \quad (30) \end{aligned}$$

同様に、供試体2, 3に対しては以下のようになる。

供試体2

$$\begin{aligned} & \underline{W_{SB}=71.6\text{kNの場合}} \\ & F_L = 0.223 \cdot v_1^{2.54} \quad (31) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \underline{W_{SB}=140.5\text{kNの場合}} \\ & F_L = 0.522 \cdot v_1^{2.54} \quad (32) \end{aligned}$$

供試体3

$$\begin{aligned} & \underline{W_{SB}=72.4\text{kNの場合}} \\ & F_L = 0.116 \cdot v_1^{2.52} \quad (33) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \underline{W_{SB}=141.3\text{kNの場合}} \\ & F_L = 0.227 \cdot v_1^{2.52} \quad (34) \end{aligned}$$

式(29)～式(34)による衝突力を式(19)～式(21)による値と比較すると図-17のようになる。両者はよく一致しており、式(19)～式(21)と式(29)～式(34)間の相互関係がよく整合していることを示している。

6. 結論

ゴム製緩衝装置の応力-ひずみ関係におよぼす衝突力の影響とゴム材質の違いがエネルギー吸収特性に与える影響を調べるため、ゴム製緩衝装置に対する衝突実験を行った。25%ひずみ時の静的せん断弾性係数が0.43MPaと1MPaの2種類の天然ゴム(供試体1, 供試体2)と高減衰ゴム(供試体3)から作成した3種類の緩衝装置供試体に対して実験を行った。ただし、本研究成果はあくまでも図-1に示した緩衝装置に対するエネルギー吸収率を与えるものであり、これよりも平面寸法や厚さが異なる場合には別途推定式を求め直す必要がある。

本解析の範囲から得られた結論は以下の通りである。

(1) 高減衰ゴムを用いた緩衝装置では、衝突前の運動エネルギー E_1 によらず、式(9)のエネルギー吸収率 γ は0.90～0.94とほぼ一定値をとる。天然ゴムを用いた緩衝装置では、衝突前の運動エネルギー E_1 が増加すると、エネルギー吸収率 γ も増加し、

両者の関係は式(17)、(18)で与えられる。

(2) 実験条件が同じであれば、エネルギー吸収率 γ は、高減衰ゴムを用いた場合の方が天然ゴムを用いた場合より1.5～3倍大きく、また、緩衝効果も大きい。これは、ゴム材の内部摩擦による減衰が天然ゴムよりも高減衰ゴムの方が大きいためである。

(3) 衝突力は衝突前の速度 v_1 のほぼ2乗に比例して増加し、この関係は式(29)～(34)によって与えられる。

謝辞：本実験の実施に際しては、(社)日本建設機械化研究所が保有する衝突実験装置を使用させていただきました。実験に際しては、谷倉泉氏、他の皆様に大変お世話になりました。ここに記して厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) Kawashima, K. and Penzien, J.: Theoretical and Experimental Dynamic Behavior of A Curved Model Bridge Structure, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 7, 129-145, 1979.
- 2) Saiidi, M. S., Maragakis, E. and Feng, S.: Parameters in bridge restrainer design for seismic retrofit, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 1, pp.55-61, 1996.
- 3) Abdel-Ghaffar, S. M., Maragakis, E. and Saiidi, M.: Effects of the hinge restrainers on the response of the aptos creek bridge during the 1989 Loma Prieta Earthquake, *Earthquake Spectra*, Vol. 13, No. 2, pp.167-189, 1997.
- 4) Desroches, R. and Fenves, G. L.: Evaluation of recorded earthquake response of a curved highway bridge, *Earthquake Spectra*, Vol. 13, No. 3, pp.363-386, 1997.
- 5) 中島章典, 庄司泰啓, 安波博道: 隣接桁の影響を考慮した高架橋システムの大地震時応答性状について, 第1回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.207-210, 1998.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 川島一彦, 渡邊学歩: 斜橋における落橋防止構造の有効性に関する研究, 土木学会論文集, 投稿中.
- 9) 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.
- 10) 伊津野和行, 児島孝之, 鈴木亮介, 和田教志, 濱田譲, 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.
- 11) 川島一彦, 庄司学, 長谷川惠一, 島ノ江哲: 衝突速度および緩衝材物性がゴム製緩衝装置の応力度～ひずみ関係に与える影響, TIT/EERG 99-5, 東京工業大学工学部耐震工学研究グループ, 1999.

(2000.4.24受付)

DYNAMIC PROPERTIES OF RUBBER-TYPE SHOCK ABSORBERS SUBJECTED TO POUNDING FORCE

Satoshi SHIMANOE, Kei-ichi HASEGAWA,
Kazuhiko KAWASHIMA and Gaku SHOJI

This paper presents an experimental study on the dynamic properties of three shock absorbing devices that are provided in bridges to mitigate the pounding effect. Shock absorbers consisting of the natural rubbers and the high damping rubber were fabricated, and they were subjected to high-compression pulsive force by means of a special apparatus. A heavy block that was designed to slope down guarded rail ways collided with a concrete block. The specimens were placed to the concrete block so that they were subjected to high pounding force. Velocity and mass of the block were varied to study the effect of energy dissipated the specimens. It was found from the test that the kinematic energy of the block controls the pounding force and deformation of the shock absorbers. The hysteresis characteristics of the shock absorbers depend on the type of rubbers.