

落橋防止機能を有する耐震伸縮装置の開発

川島一彦¹・庄司学²・越峠雅博³・島ノ江哲⁴

¹フェロー 工博 東京工業大学大学院教授 理工学研究科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

²正会員 修(工) 東京工業大学大学院助手 理工学研究科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

³正会員 横浜ゴム株式会社 工業資材技術部 (〒254-0047 神奈川県平塚市追分2-1)

⁴正会員 工修 横浜ゴム株式会社 工業資材技術部 (〒254-0047 神奈川県平塚市追分2-1)

現在、隣接する桁間あるいは桁－橋台間の衝突を緩和するための落橋防止システムの開発が多方面から進められている。筆者らは、桁端部と桁間連結装置にゴム製緩衝装置を取り付けることを提案しており、ゴム材質や載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衝突実験により明らかにしてきた。これらの知見を踏まえ、本研究では、ゴム製緩衝装置を伸縮装置内に設置した新しい落橋防止システムを提案するものである。死荷重や活荷重を荷重支持ビームで支持し、地震時における衝突力を圧縮側・引張側の緩衝装置で緩和する構造となっており、ゴム製緩衝装置を伸縮装置内に設置することにより桁端部および橋台部の構造を簡素化することができる。

Key Words : expansion joint, 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イルセーフ機能を有するべき落橋防止構造に衝撃的な地震力の作用が原因と考えられる被害がみられた。兵庫県南部地震以降は、衝撃的な地震力による落橋を防止するために、免震支承やゴム支承を用い上部構造を弾性支持する方式が広く採用されている。しかし、桁を弾性支持することにより桁の長周期化を招き、上部構造の応答変位が増大する結果、隣接桁間あるいは桁－橋台間で衝突が起きる可能性も生じてくる。このため、地震時の衝突力を緩和する目的で落橋防止システムの開発が多方面から進められている。橋梁の設計においては桁端の死荷重反力の1.5倍に相当する水平力が落橋防止構造の設計地震力として用いられているが、解析的に求められた落橋防止構造に作用する地震力は桁間連結装置により大きく異なり、上記設計地震力を上回る大きな値となる場合もあることが報告されている^{1), 2)}。

このような大きな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。緩衝装置を有する落橋防止構造は上部構造、下部構造にブラケットや突起を設けるものが一般的であるが、落橋防止構造自体の大きさに対し、これを設置できるスペースは決して大きなものではない。そこで、伸縮装置内桁間連結装置とゴム製緩衝装置を組み込んだ新しい落橋防止システムを開発したのでその概要を示す。また、ゴム製緩衝装置には積層

ゴムの設計で通常考慮される8～15MPaを上回る大きな面圧が作用することが予想される。そこで、衝突実験によりゴム材質や圧縮載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明らかにし、衝突力および吸収エネルギーを定式化した。これを用いた緩衝装置の設計法についても検討を加える。

2. 落橋防止構造の検討

(1) 橋梁の設計における伸縮装置の現状

平成8年12月の道路橋示方書では、伸縮装置には従来から考慮されていた温度変化、クリープ、桁の回転等による常時の桁の移動量に加えて、震度法レベルの地震力による桁の移動量に対しても追従することが求められるようになった³⁾。

これに対し、日本道路ジョイント協会では伸縮装置が保証できる伸縮量、耐力について限界性能を明示し、これを地震時性能として地震時の設計に適用することを提案している⁴⁾。しかし、これは伸縮装置の構造と静的な特性に基づいて定められただけのものであり、ほとんどの伸縮装置は設計地震力を見込んで設計されていないのが現状である。橋梁の実務設計においては伸縮装置は遊間量と桁の移動量だけを考慮して選定されることが多い。

(2) 耐震伸縮装置の構造

今回提案する耐震伸縮装置は落橋防止構造を伸縮

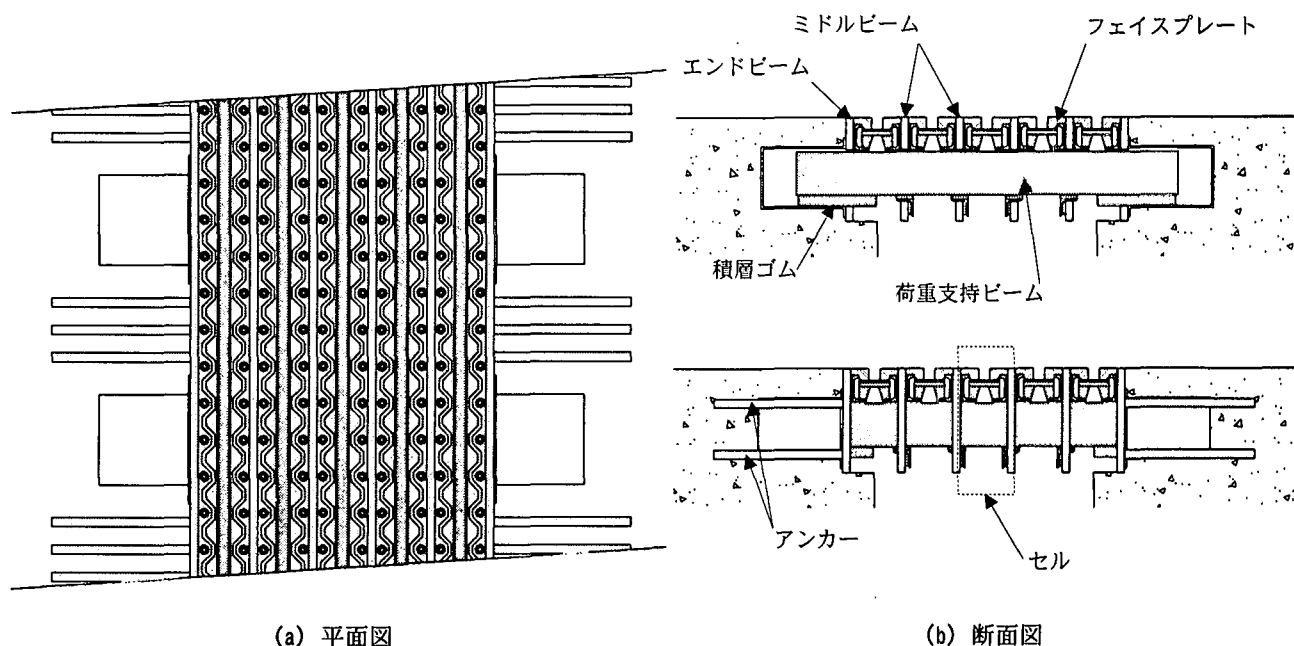


図-1 耐震伸縮装置基本構造

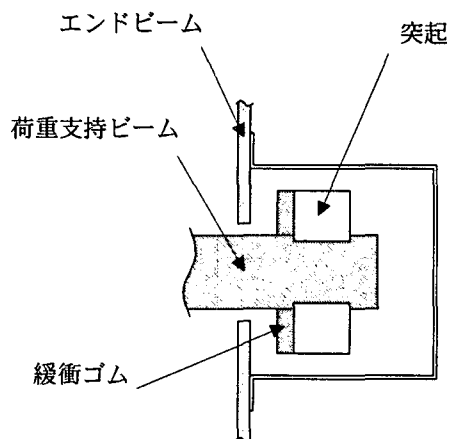


図-2 荷重支持ビーム端部構造

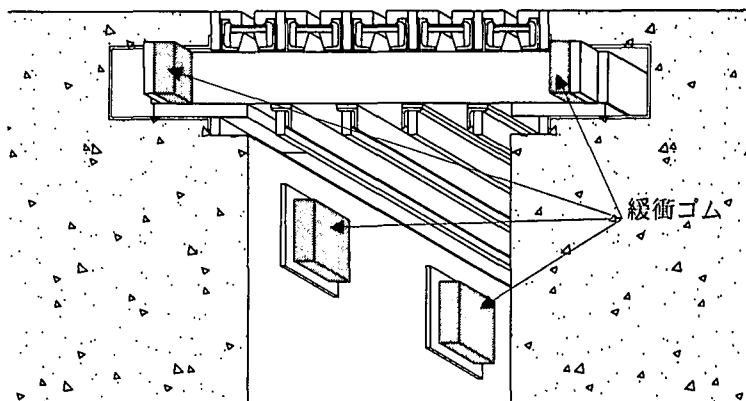


図-3 ゴム製緩衝装置取付概念

装置内に組み込んだものである。耐震伸縮装置の基本構造を図-1に示す。ミドルビームと呼ばれる幅員方向に平行に並ぶ鋼材とミドルビームを貫通して交差するように一定のピッチで配置した荷重支持ビームが主構造部材である。隣り合うミドルビームの間をセルと呼び、フェイスプレートおよび鋼材を加硫接着したゴムからなる。上面に作用する自動車からの輪荷重はミドルビームおよびセルから、荷重支持ビーム、積層ゴムを介して床版あるいは橋台へと伝達される。桁の伸縮に対してはゴムのせん断変形により追従する。セル1つ当たりの常時および地震時の許容伸縮量はそれぞれ $\pm 30\text{mm}$ 、 $-40 \sim +30\text{mm}$ であり、セルの数により伸縮量調整ができる。図-1に示す伸縮装置では5セルであるため $\pm 150\text{mm}$ の伸縮量を有することになる。荷重支持ビームの両端には、桁の伸縮に追従するために必要な空間が確保されている。両端のエンドビームにはアンカーが設置して

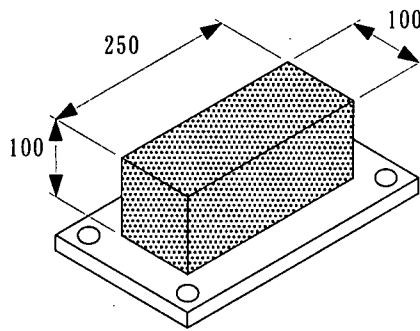
あり、これと補強鉄筋を溶接し、コンクリートを打設することにより床版あるいは橋台へ固定される。

荷重支持ビーム端部の構造を図-2に示す。桁遊間が広がる方向の動きに対しては、荷重支持ビームの端部に設けた突起とエンドビームがぶつかることにより制限される。突起部に緩衝ゴムを取り付けることにより衝撃的な地震力を緩和する。

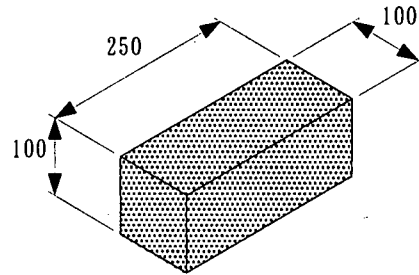
遊間が閉じる方向の動きに対しては図-3のように直接橋台あるいは桁端に緩衝ゴムを直接設置することにより、桁どうしあるいは桁-橋台が直接衝突することを回避し、衝撃的な地震力を緩和する。以上のような構造にすることで、遊間が広がる方向、閉じる方向、いずれもゴム材の圧縮変形を利用することができ、衝撃的な地震力を緩和することが可能となる。また、上部構造、下部構造にブラケットや突起を別途設ける必要がないので桁端部および橋台部の構造を簡素化することができる。

表-1 供試体寸法と主な物理的性質

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%伸長応力 (kgf/cm ²)	4.3	10	4.2
	引張り強さ (kgf/cm ²)	227	140	143
	伸び (%)	730	550	753
	硬さ (Hs)	34	60	—
取り付け鋼板		あり	なし	なし



(a) 供試体 1, 3



(b) 供試体 2

図-4 ゴム製緩衝装置

4. ゴム製緩衝装置の動的特性

(1) 衝突実験

a) 実験に用いた供試体

実験には表-1に示す3種類の供試体を用いた。供試体1は建築免震用ゴム支承材料として、供試体2は橋梁用ゴム支承材料としてよく用いられる天然ゴムで、25%伸長時のせん断弾性係数はそれぞれ0.43MPa、1MPaである。供試体3は高減衰ゴムで25%伸長時のせん断弾性係数は供試体1とほぼ同じ0.42MPaであり、樹脂配合により高い減衰性能を有した橋梁用ゴム支承の材料として用いられている。

図-4に示すように供試体の寸法は幅100mm、長さ250mm、厚さ100mmですべて同じであるが、供試体2はゴム単体からなるのに対して、供試体1、3は緩衝装置として取付けられるように片面に厚さ16mmの鋼板が加硫接着してある。

b) 実験方法および実験条件

衝突実験は(社)建設機械化協会建設機械化研究所の衝突実験装置を用いて行った。衝突実験装置の概要を図-5(a)に示す。レール上に置かれた台車が斜面上を滑り落ち6mの水平区間を滑走後、コンクリートブロックの前面に取り付けられたゴム製緩衝装置に衝突するようになっている。これにより、ゴム製緩衝装置に衝撃的に大きな力を作用させることができる。

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、変位を時間微分することにより台車が供試体に衝突する直前や直後の速度を求めることができる。衝突時に供試体に作用した衝撃力は緩衝装置を取り付けた鋼製の固定台とコンクリートブロックの間に設置したロードセルによって測定した。荷重は動ひずみ計を介して、変位と速度は直接データレコーダーにサンプリング時間0.2msecで収録した。

衝突部の概要を図-5(b)に示す。供試体2は両面テープによって、供試体1、3は鋼板を固定台にボルトによって固定した。固定台と台車の衝突面は供試体が圧縮変形しても両者の間から膨出せずかつ、側面(自由面)が拘束されないように設計した。

3種類の供試体に対して、目標衝突速度を1.25、1.77、2.50m/sの3通り、台車重量を約72kNと約141kNの2種類とし、表-2に示す15ケースの実験を行った。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橋桁の応答速度を想定して定めたものである。地震時に緩衝装置には繰り返して衝撃力が作用することが想定されるため各供試体に対して5～6回のくり返し実験を行った。しかし、1回実験を行った後に再び台車を所定の位置まで引き上げるのに約10分を要するため、くり返し実験の間隔は約10分である。このため、ゴム製緩衝装置の大変形圧縮時の载荷周波数依存性に関する

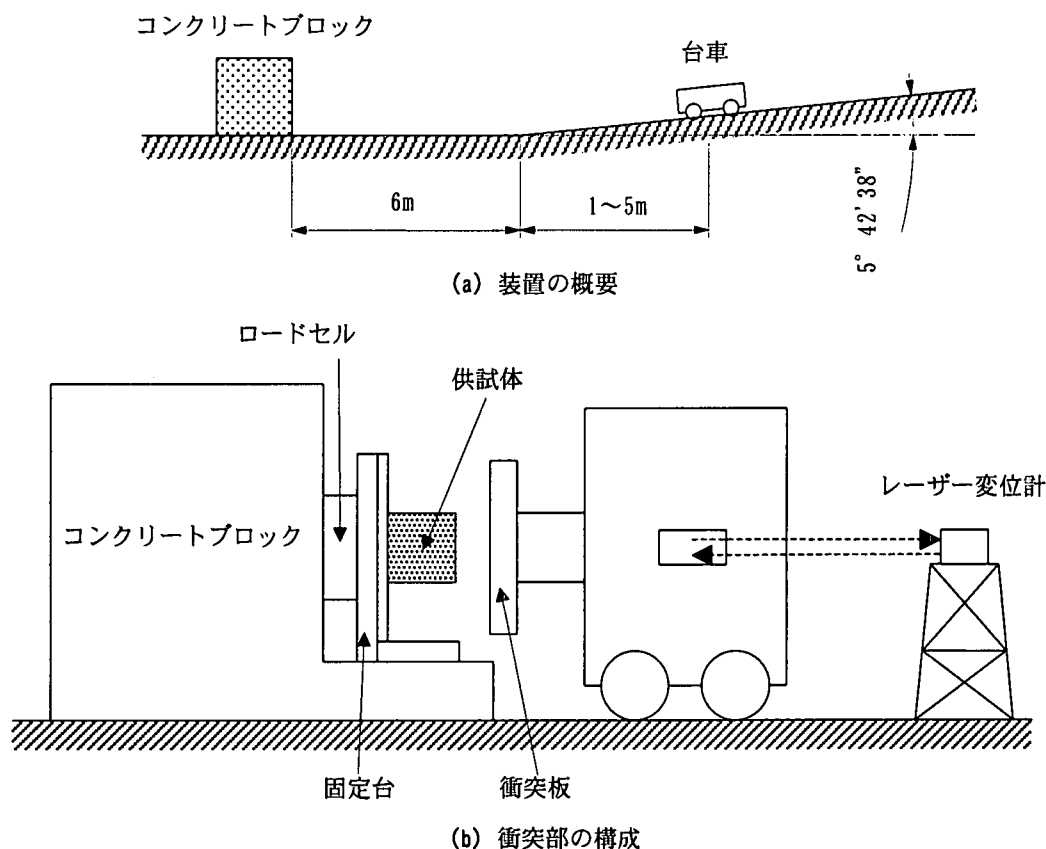


図-5 実験の概要

実験を別途行う必要がある。

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

(2) 応力～ひずみ履歴

供試体 3 において衝突前の運動エネルギーが異なる実験ケースとほぼ同じであった実験ケースに対する応力～ひずみの関係を示した結果が図-6 である。ここで、衝突前の運動エネルギー E_1 は次式によって求めた値である。

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

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

応力はロードセルから、ひずみはレーザー変位計から求めた。図-6 におけるゴム製緩衝装置の圧縮ひずみは約 0.7、応力は約 70MPa に達し、ゴムが通常用いられる範囲を大きく超えるものである。衝突エネルギーが異なる場合でも载荷履歴はほぼ同じ経路をたどっているのがわかる。また、台車重量と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がほぼ同じであることがわかる。これは、供試体 1, 2 においても同じであった。

衝突前の運動エネルギーがほぼ同じ場合の応力～ひずみ関係を供試体 1～3 の間で比較した結果が図-7 である。同じ衝突エネルギーが作用してもゴム材質が異なると応力～ひずみ履歴には大きな違いがみられる。最大応力、最大ひずみともに供試体 3、供試体 2、供試体 1 の順に大きくなっている。高減衰ゴムは履歴吸収エネルギーを大きくするために初期ひずみ時の弾性係数が天然ゴムと比較して高くなるように材料設計されている。このため、供試体 3 は供試体 1, 2 に比較して応力やひずみが小さい。供試体 1 と 2 の違いは表-1 に示した弾性係数の違いによるものである。

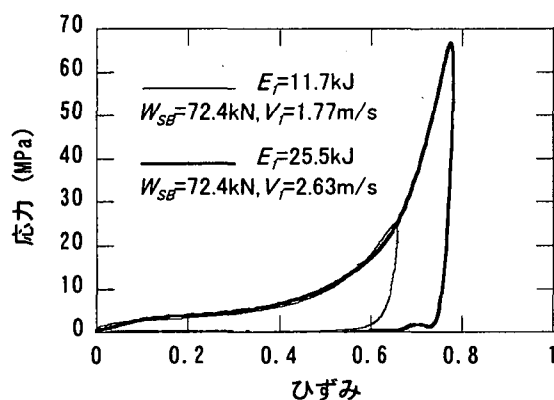
供試体 2 に対してくり返し衝突実験を 5 回行った際の応力～ひずみ履歴特性を図-8 に示す。1 回目の衝突時の応力は 2 回目以降の衝突時の応力よりも小さくなっている。ここには示していないが、供試体 1, 3 に関しても同じ傾向がみられた。このときの衝突回数がゴム材のエネルギー吸収率に及ぼす影響を示した結果が図-9 である。ここで、エネルギー吸収率は次式によって定義する。

$$\gamma = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \quad (2)$$

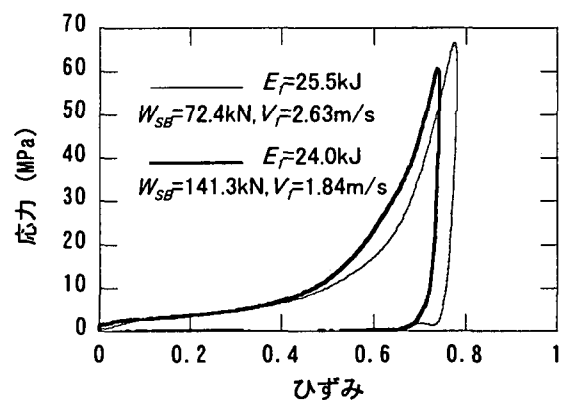
ここで、 E_2 は衝突後の運動エネルギーで次式にて求められる。

表-2 衝突実験の条件

実験 ケース	供試体 タイプ	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 (℃)	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		



(a) 衝突エネルギーが異なる場合



(b) ほぼ同じ衝突エネルギーを受けた場合

図-6 同一供試体の履歴の比較

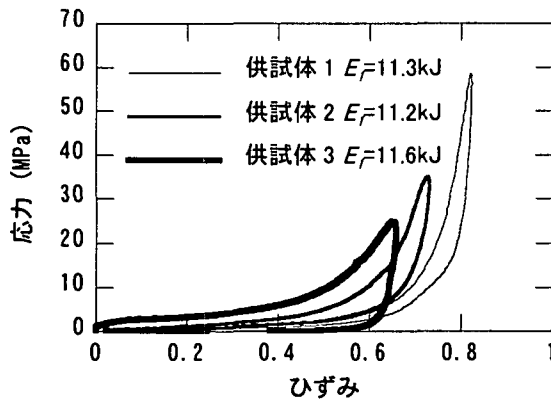


図-7 ほぼ同じ衝突エネルギーを受けた場合の供試体1～3の履歴特性の比較

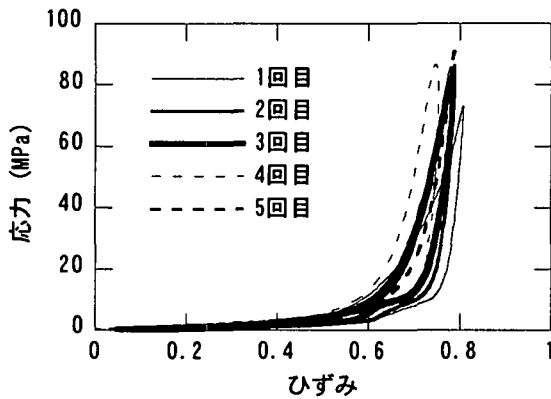


図-8 繰り返して衝突させた場合の供試体2の履歴特性

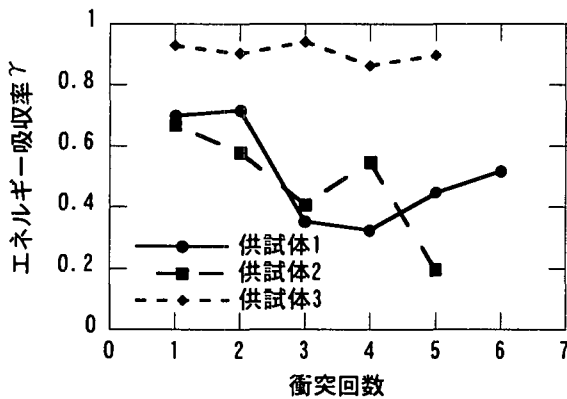
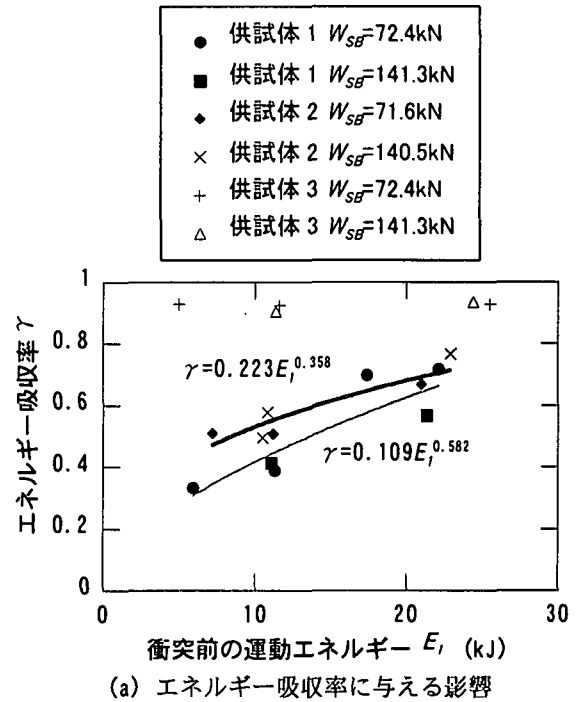


図-9 衝突回数とエネルギー吸収率の関係

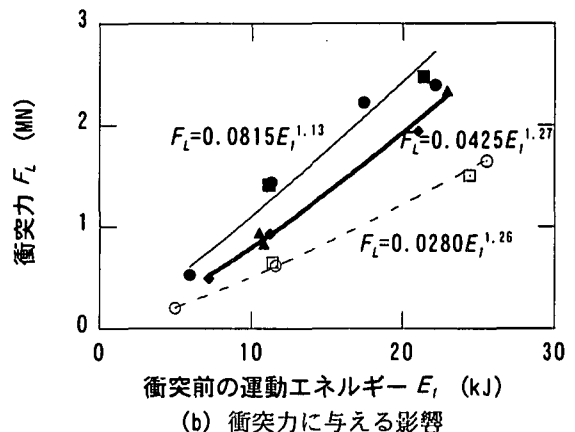
$$E_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{W_{SB}}{g} \cdot v_2^2 \quad (3)$$

ここに、 v_2 ：衝突後の台車の速度である。

供試体1ではエネルギー吸収率は1回目の衝突では約70%であるが、3回目の以降の衝突では30～50%に減少する。供試体2では1回目の衝突時の約65%から5回目の衝突時の約20%まで衝突回数が増大するにつれてエネルギー吸収率はおおむね徐々に減少する。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



(a) エネルギー吸収率に与える影響



(b) 衝突力に与える影響

図-10 衝突前の運動エネルギーが及ぼす影響

い値を保っている。これより、高減衰ゴムは天然ゴムと比較するとエネルギー吸収性能が優れており、かつ、くり返し衝突回数の依存性が少ないことがわかる。

残留ひずみは天然ゴムを用いた供試体1、2で2%以下であるのに対して高減衰ゴムを用いた供試体3では約10%と非常に大きい。

(3) 力学的特性の定量化

動的応答解析によって衝突前の桁の速度を求めることができれば、これから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。緩衝装置を設計するにあたっては、桁の衝突速度や衝突エネルギーにより緩衝装置に作用する衝突力やエネルギー吸収率がどの程度になるかを推定する必要がある。

前節までの検討から同一供試体であれば、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から、衝突前の台車の運動エネルギーに基づいてエネルギー吸収率および衝

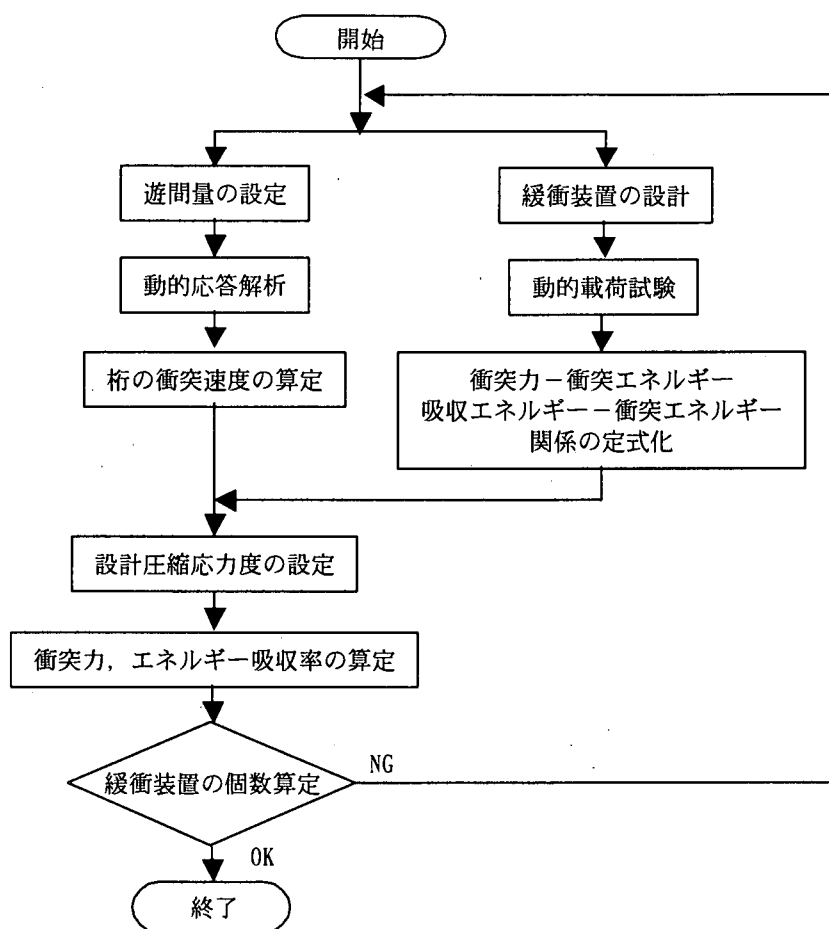


図-11 緩衝装置設計フローチャート

突力の関係を定式化する。

エネルギー吸収率が台車の衝突前の運動エネルギーによってどのように変化するのかを示した結果が図-10(a)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 には大きな違いがみられる。供試体 3 ではエネルギー吸収率は運動エネルギーに関係なくおおむね次のように与えられる。

$$\gamma = 0.92 \quad (4)$$

これに対して、天然ゴムを用いた供試体 1, 2 ではエネルギー吸収率は衝突前の運動エネルギーが大きいほど大きくなり、両者の関係を最小 2 乗近似すると以下ようになる。

$$\text{供試体 1} \quad \gamma = 0.109 \cdot E_1^{0.582} \quad (5)$$

$$\text{供試体 2} \quad \gamma = 0.233 \cdot E_1^{0.358} \quad (6)$$

図-10(a)には式(5), (6)による値も示しているが、両式による推定値は実験結果をよく表している。

次に、衝突力が台車の衝突前の運動エネルギーによってどのように変化するのかを示した結果が図-10(b)である。これより、両者の関係を最小 2 乗近

似すると、次式が得られる。

$$\text{供試体 1} \quad F_L = 0.0815 \cdot E_1^{1.13} \quad (7)$$

$$\text{供試体 2} \quad F_L = 0.0425 \cdot E_1^{1.27} \quad (8)$$

$$\text{供試体 3} \quad F_L = 0.0280 \cdot E_1^{1.26} \quad (9)$$

図-10(b)には式(7)~(9)による値も示しているが、これらは実験結果をよく表している。

5. ゴム製緩衝装置の設計法

落橋防止構造として使用する緩衝装置の設計フローチャートを図-11に示す。式(4)~(9)はあくまでも図-4, 表-1に示した断面、寸法を持つ緩衝装置に対するエネルギー吸収率 γ および衝突力 F_L を与えるものであり、これとは平面寸法や厚さ、载荷面の形状が異なる場合には別途推定式を求め直す必要があるが、以下にはこれらの式を用いた場合の結果を示す。

都市高架橋に対して動的応答解析を行った結果、最初の桁間衝突が起きる前の桁間の相対速度は約

0.6m/secと求められた。いま、この条件を用いて図-11に示したフローチャートに従い緩衝装置の設計を行ってみよう。ゴム製緩衝装置の形状は図-4に示した形状で、高減衰ゴムからできているとする。ゴム製緩衝装置は面圧100MPaに達するくり返し衝突に対しても安定した耐力を有しており、50MPa以上の面圧が作用し70%以上のひずみが生じても応力～ひずみ関係が安定していること⁹⁾から、ゴム製緩衝装置の設計圧縮応力度を50MPaにする。

このような条件のもとに動的解析によって上記条件による衝突力を求めると34.7MNとなり、緩衝装置を設置しない場合の衝突力55MNに対して37%低減される。また、衝突後の桁間の相対速度は0.6m/sから0.048m/sに減速する。この条件で緩衝装置の個数を求めると桁遊間が広がる方向、閉じる方向ともにそれぞれ28個ずつとなる。

6. 結論

伸縮装置内の荷重支持ビームを利用することにより桁どうしあるいは桁-橋台を連結し、その両端にゴム製緩衝装置を配置することにより桁遊間が広がる方向の衝撃的な地震力を緩和する落橋防止構造として機能する耐震伸縮装置を開発した。桁遊間が閉じる方向に対しても直接桁端あるいは橋台にゴム製緩衝装置を設置することにより桁間あるいは桁-橋台間の衝突力を緩和し桁間または橋台の破損を防止することができる。これにより、桁端部および橋台部の構造を簡素化できる。

耐震伸縮装置に用いるゴム製緩衝装置の動的特性を明らかにするために行った衝突実験により、約100MPaの高応力、約80%の高ひずみ状態においても安定した応力～ひずみ関係を有していること、繰り返し圧縮荷重に対しても安定した耐力を示すことがわかった。実験結果に基づき衝突前のエネルギーと衝突力および吸収エネルギーの関係を定式化することにより、落橋防止構造用のゴム製緩衝装置の設計法を提案した。

7. 今後の課題

今回開発した耐震伸縮装置に用いるゴム製緩衝装置は耐震伸縮装置の動的な挙動を考慮した上で設計する必要がある。このため、今後、プロトタイプ模型による動的载荷実験を行い、耐震伸縮装置および緩衝装置の取付け構造を含めた詳細設計を行っていく必要がある。

また、ゴム製緩衝装置の動的圧縮特性に対する形状（平面寸法、厚さ）に関する影響を実験を含めて検討し、任意形状の緩衝装置に対する衝突力や吸収エネルギーが推定できるようにしていく必要がある。さらに、衝突実験では検討できないゴム製緩衝装置の大変形圧縮時の载荷周波数依存性に関しても検討を行っていく必要がある。材料面からは高面圧、高ひずみ状態で用いられるゴム製緩衝装置に適したゴム材の開発を行っていく必要がある。

謝辞：衝突実験の実施に際しては、（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。ここに記して厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 矢部正明, 竹村浩志, 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
- 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
- 3) 日本道路ジョイント協会技術委員会: 伸縮装置選定要領(案), 1999.11
- 4) 日本道路橋会: 道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 1996.12
- 5) 川島一彦, 庄司学, 長谷川恵一, 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～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.

DEVELOPMENT OF EARTHQUAKE-RESISTANT EXPANSION JOINTS WITH UNSEATING PREVENTION

Kazuhiko KAWASIMA, Gaku SHOJI, Masahiro KOSHITOUGE, Satoshi SHIMANOE

The unseating prevention devices which absorb high pounding force between girders or girder and pier are developed by various sources. Rubber-type shock absorbers were proposed for this application. The collision tests resulted that the stress-strain hysteresis of the shock absorbing devices significantly depends on the material components and loading rates. This paper presents a expansion joints, in which the shock absorbing device is installed, as a new unseating prevention system. The beams works not only as a support for the wheel loads for vehicles, but also as a shock absorber for seismic loads. This system simplifies the structure at the end of the girders and the piers.