

振動台実験によるゴム製緩衝装置の有効性に関する検討

庄司学¹・川島一彦²・Anat Ruangrassamee³・運上茂樹⁴・足立幸郎⁵・長屋和宏⁶

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 修（工） 東京工業大学大学院 理工学研究科 博士後期課程（同上）

4 工博 建設省土木研究所室長 耐震技術研究センター耐震研究室（〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地）

5 工修 建設省土木研究所主任研究員 耐震技術研究センター耐震研究室（同上）

6 建設省土木研究所研究員 耐震技術研究センター耐震研究室（同上）

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震以降、免震橋や地震力分散式橋梁などの長周期系の連続橋梁が積極的に採用されている。免震橋では、免震支承を設け、長周期化することにより桁から下部構造に伝達される地震力の低減が可能となり¹⁾、また、地震力分散式橋梁では、積層ゴム支承を用いて桁を弾性支持することにより桁の慣性力の分担を下部構造間で平滑化し、橋全体系の耐震性を向上させることができる。

しかし、免震支承や積層ゴム支承を用いると長周期化するため、桁の応答変位が増大し、隣接桁間の桁掛け違い部や桁一橋台間で衝突が生じる可能性がある。そのため、現在、桁間衝突を防止するための緩衝装置の開発が急務となっている。

桁間衝突が生じた場合の衝突力を解析的に求めると、桁重量に比べて数倍程度の大きな値となり²⁾、その結果、緩衝装置には非常に大きな面圧が作用する。ゴム製緩衝装置の圧縮性能は、そのような高ひ

ずみ・高面圧下においても荷重の繰り返し回数や載荷速度に対して比較的安定していることが実験的に確認されており³⁾、そのため、ゴム製緩衝装置は衝突緩衝材として有望であると考えられる。また、伊津野ら⁴⁾もゴム材の圧縮性能を利用した変位ストッパーとしての機能を有する反力分散装置に対してハイブリッド地震応答実験を行っている。

このように、桁間の衝突やゴム製緩衝装置を桁端部に設置した場合の衝突緩衝効果を解析的・実験的に検討した例は少ない。以上より、本研究では、固有周期が異なる2連の桁橋の桁端部にゴム製緩衝装置を設置し、振動台実験を行い、それらによる桁間衝突に対する緩衝効果について検討を行った。

2. 実験供試体および実験方法

本実験で対象とした供試体は、図-1に示す固有周期が約1.6倍異なる2連の単純桁橋である。橋脚の断面寸法は3.2mm×30mmで、高さが306.5mmの2

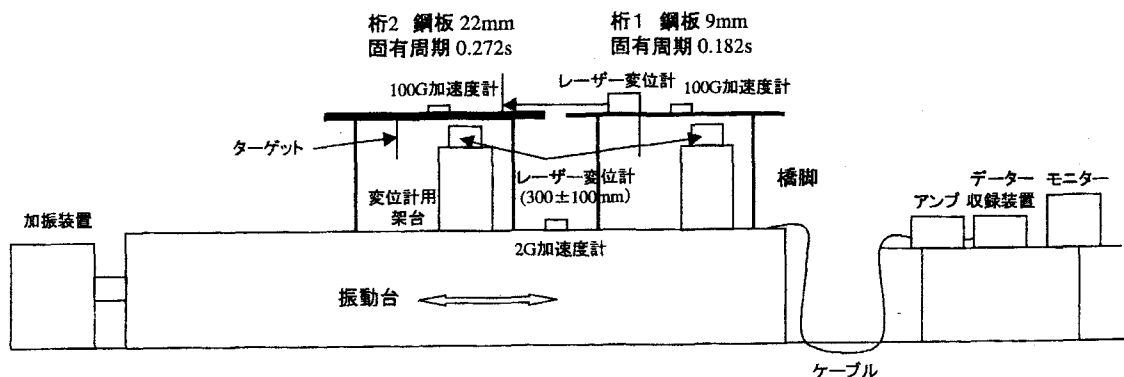


図-1 実験供試体の概要

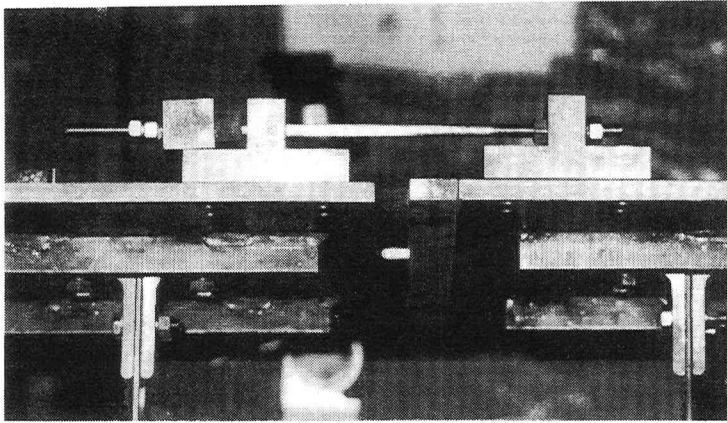


写真-1 ゴム製緩衝装置

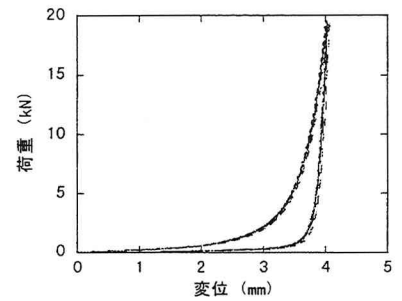
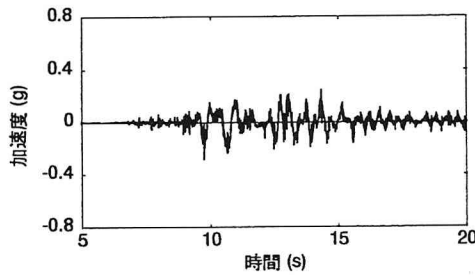
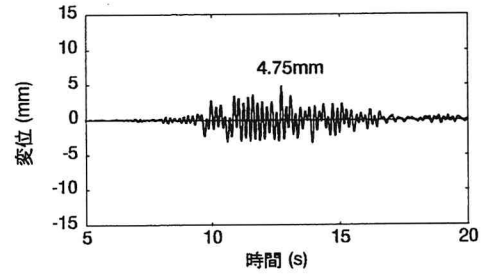


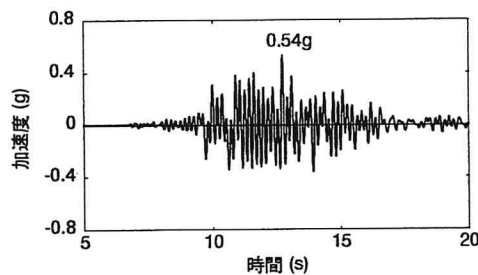
図-2 ゴム製緩衝装置の圧縮特性



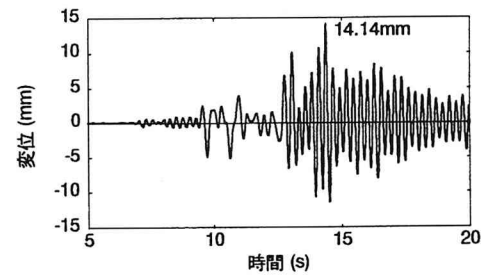
(a) 振動台の加速度



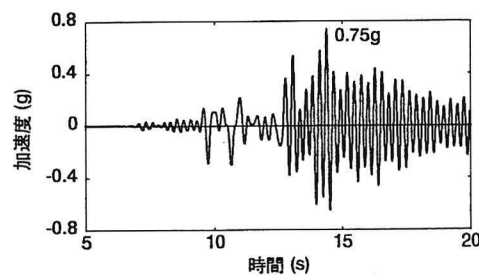
(d) 桁1の変位



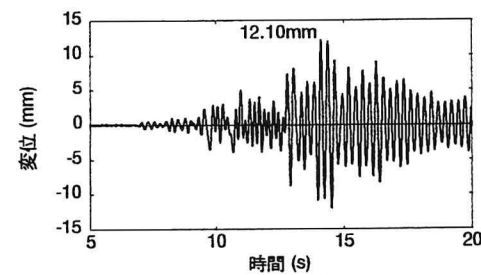
(b) 桁1の加速度



(e) 桁2の変位



(c) 桁2の加速度



(f) 桁1-桁2間の相対変位

図-3 衝突しない場合の桁1, 桁2の応答

本の橋脚の上に厚さ 9mm の鋼板を、高さが 300mm の橋脚の上に厚さ 22mm の鋼板をそれぞれ設置した（以下では、桁 1、桁 2 と呼ぶ）。桁 1 と桁 2 の質量はそれぞれ 21.195kg, 51.81kg である。固有値解析により桁 1、桁 2 の固有周期を求めると 0.181 秒, 0.282 秒となる。

ゴム製緩衝装置を写真-1 に示す。桁 1 と桁 2 が閉じる方向には桁端部の緩衝装置が機能し、桁 1 と桁 2 が開く方向には桁間連結棒を介して緩衝装置が機能する構造となっている。桁端部の緩衝装置は 15mm

×9mm, 厚さ 5mm の直方体で、桁間連結棒に設置する緩衝装置は 15mm×12mm, 厚さ 5mm の直方体である。振動台実験で用いた緩衝装置と同一材料、同一寸法の装置に対して、繰り返し圧縮载荷実験を行った結果を示すと図-2 のようになる。

実験には、建設省土木研究所の中型振動台を使用し、入力地震動としては、兵庫県南部地震の際に神戸海洋気象台で観測された NS 成分記録の振幅をスケールリングダウンした加速度波形を用いた。

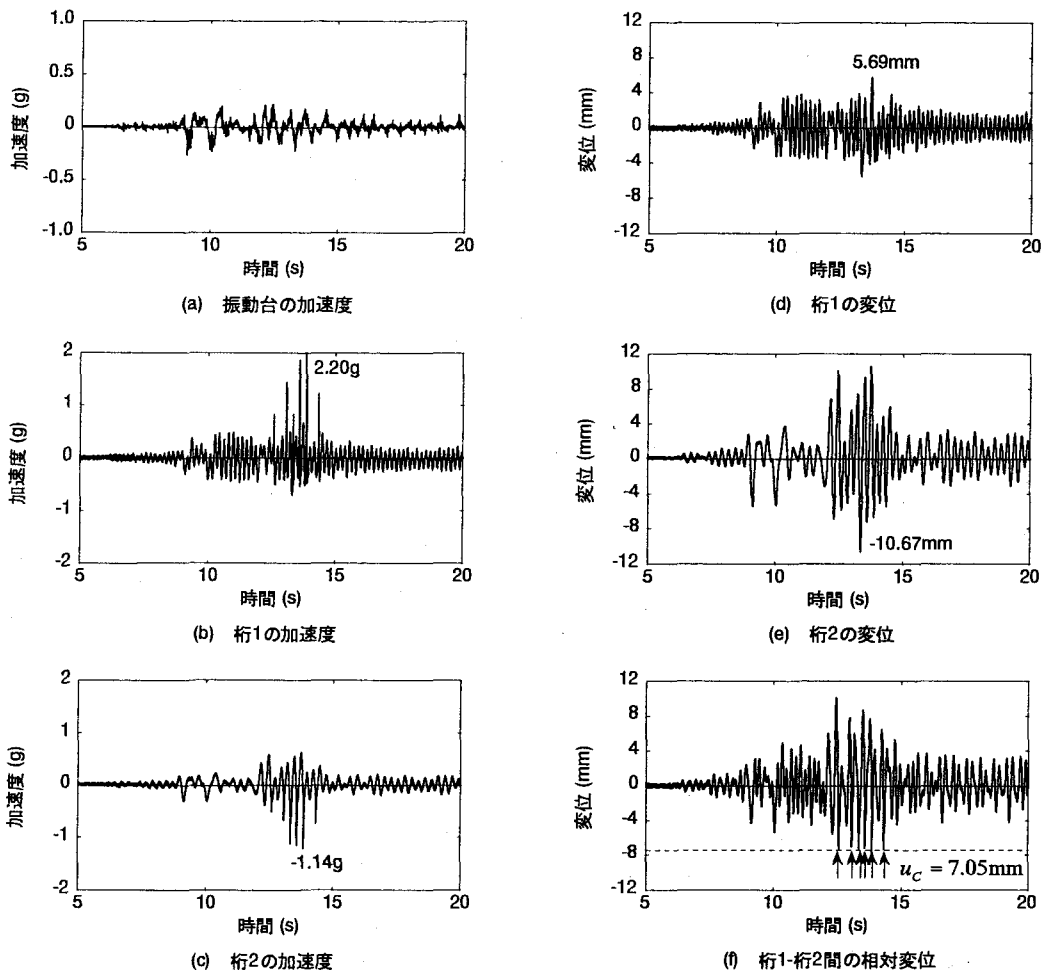


図-4 衝突した場合（緩衝装置なし）の桁 1，桁 2 の応答

3. ゴム製緩衝装置を設けない場合の応答特性

図-3 および図-4 は、桁遊間 u_c を大きくとり衝突が生じない場合と、桁遊間 u_c を 7.05mm に設定して衝突が生じた場合の桁 1 と桁 2 の応答加速度、応答変位、および桁 1—桁 2 間の相対変位を示した結果である。これより、衝突が生じない場合の桁 1，桁 2 の応答加速度は 0.54g，0.75g であるのに対して、衝突が生じると、桁 1 では 2.20g，桁 2 では 1.14g の大きなパルス状の応答加速度が生じ、同様に、衝突しない場合に比較して、衝突する場合には、桁の応答変位は、固有周期の短い桁 1 では 4.75mm→5.69mm と増加し、固有周期の長い桁 2 では 14.14mm→10.67mm と減少する。すなわち、衝突に伴い、桁 1，桁 2 の応答変位が平滑化される方向に変化している。

いま、衝突による桁の変位応答の平滑化の度合いを表すために、桁変位の平滑化度係数 κ を以下のように定義する。

$$\kappa = \frac{|u_2|}{|u_1|} \quad (1)$$

ここで、 u_1 ， u_2 はそれぞれ、2 連の桁のうち、応答変位の小さい方、大きい方の最大応答変位であり、本実験では、それぞれ桁 1，桁 2 の応答変位となる。式(1)より平滑化度係数 κ を求めると、衝突が起こらない場合には 2.98 であったものが衝突が起こった場合には 1.88 と小さくなり、衝突による 2 連の桁の応答変位の平滑化の度合いを与える指標となっている。

図-5 および図-6 には、衝突が起こった前後の応答加速度、応答速度を示す。衝突は全部で 6 回起きているが、ここでは、そのうちの 2 回分を示す。これによれば、衝突が始まった時刻 t_{cd}^p ははっきりと判別できるが、衝突が終わった時刻 t_{cd}^p ははっきりとはわからない。このため、ここでは、以下の 2 種類の方法で衝突終了時刻 t_{cd}^p を与えることとした。

定義 1: 加速度応答が変曲点を持つ時刻を t_{cd}^p とする。

定義 2: 応答が小さいため速度変化がとらえやすい桁 1 において速度が最大となる時刻を t_{cd}^p とする。

このように、衝突終了時刻 t_{cd}^p を定義すると、衝突時間 Δt^p は次式のようになる。

$$\Delta t^p = t_{cd}^p - t_{cd}^p \quad (2)$$

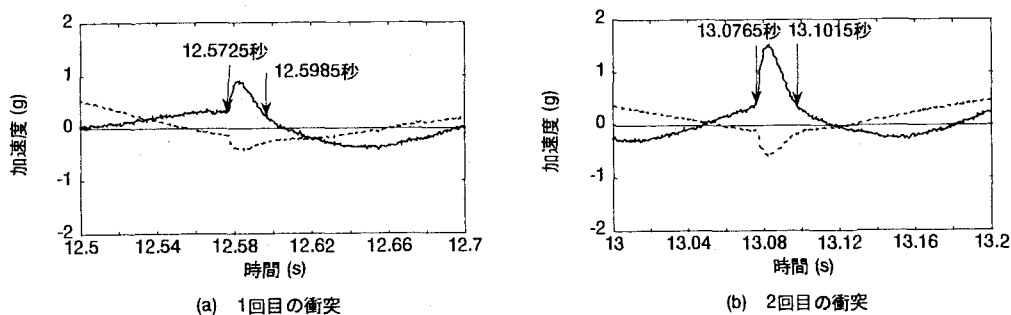


図-5 衝突時の応答加速度

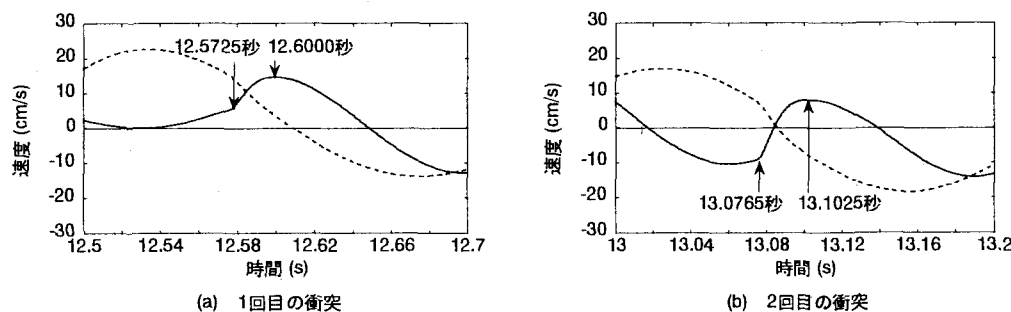


図-6 衝突時の応答速度

表-1 衝突開始時刻 t_{st}^P (s), 衝突終了時刻 t_{ed}^P (s)および衝突時間 Δt^P (s)

		1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目
衝突開始時刻		12.5725	13.0765	13.3535	13.5945	13.8675	14.3385
衝突終了時刻	定義1によった場合	12.5985	13.1015	13.3715	13.6160	13.8890	14.3620
	定義2によった場合	12.6000	13.1025	13.3700	13.6125	13.8890	14.3640
衝突時間	定義1によった場合	0.0260	0.0250	0.0180	0.0215	0.0215	0.0235
	定義2によった場合	0.0275	0.0260	0.0165	0.0180	0.0215	0.0255

表-2 衝突開始時の速度 v_j^s (cm/s)および衝突終了時の速度 v_j^{ed} (cm/s)

(a) 定義1より衝突終了時刻 t_{ed}^P (s)を求めた場合

		1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目
桁1	衝突開始時の速度	5.5	-9.0	-11.8	-7.8	-10.4	-6.0
	衝突終了時の速度	14.4	7.9	-3.0	10.0	14.7	10.0
桁2	衝突開始時の速度	14.5	7.0	3.0	18.0	12.5	6.0
	衝突終了時の速度	4.0	-7.5	-10.5	-2.5	-4.5	-4.5

(b) 定義2より衝突終了時刻 t_{ed}^P (s)を求めた場合

		1回目	2回目	3回目	4回目	5回目	6回目
桁1	衝突開始時の速度	5.5	-9.0	-11.8	-7.8	-10.4	-6.0
	衝突終了時の速度	14.5	8.1	-2.9	10.5	14.9	10.5
桁2	衝突開始時の速度	14.5	7.0	3.0	18.0	12.5	6.0
	衝突終了時の速度	3.3	-8.0	-9.8	-1.0	-4.0	-5.0

表-1 は、式(2)より衝突時間 Δt^P を求めた結果である。衝突終了時刻 t_{ed}^P を定義 1 より求めた場合と定義 2 より求めた場合では、衝突時間 Δt^P にはほとんど差がない。衝突時間 Δt^P の評価法については今後、さらに検討する必要があるが、本論文の定義に基づく 6 回の衝突で以下の範囲にある。

$$\Delta t^P = \begin{cases} 0.0180 \sim 0.0260 \text{ s} = 38.5 \sim 55.6 \text{ Hz} & \text{定義 1} \\ 0.0165 \sim 0.0275 \text{ s} = 36.4 \sim 60.6 \text{ Hz} & \text{定義 2} \end{cases} \quad (3)$$

衝突を開始した時刻 t_{st}^P と衝突が終了した時刻 t_{ed}^P における応答速度 v_j^s , v_j^{ed} ($j=1,2$) を求めると表-2 のようになる。衝突前後の応答速度をベクトルとして示すと図-7 のようになる。1 回目の衝突では、衝突前の桁 1 と桁 2 の速度ベクトルが同方向で、桁 1 に桁 2 が追突し、衝突後の桁 1 と桁 2 の速度ベクトルは衝突前の速度ベクトルと同方向のままである。2 回目および 4~6 回目の衝突では、衝突前の桁 1 と桁

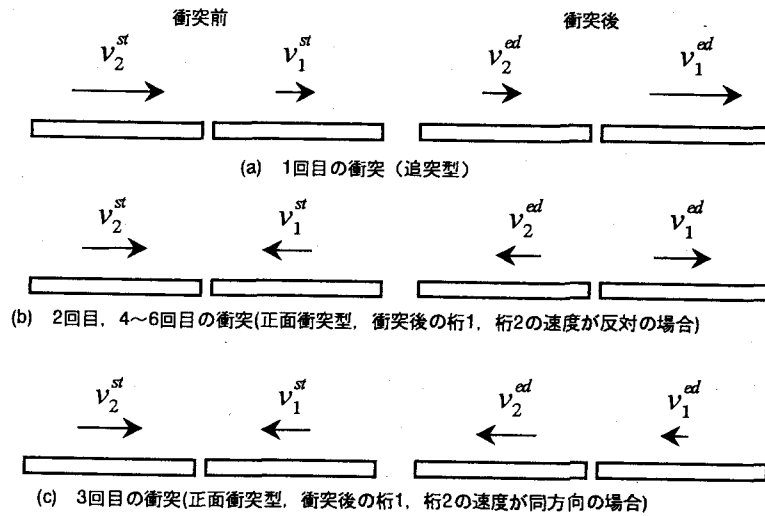


図-7 衝突前後の様子

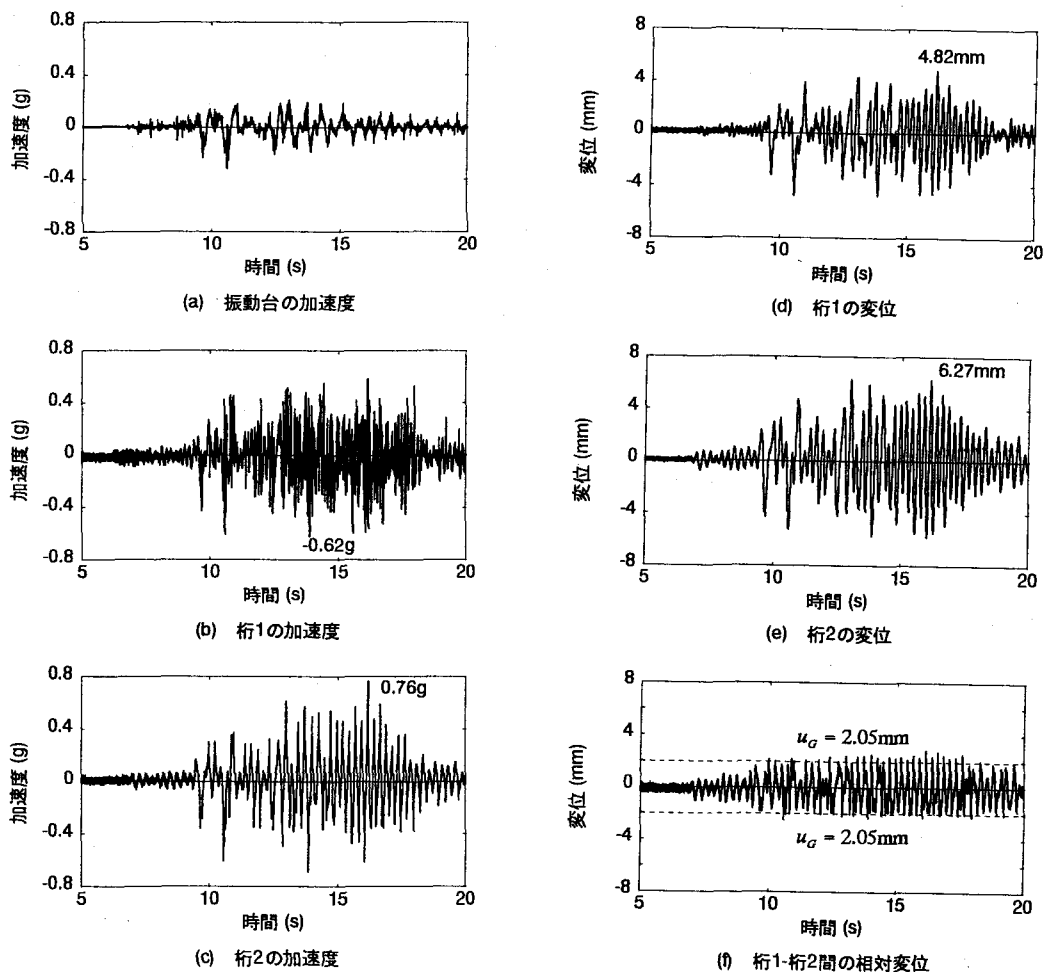


図-8 緩衝装置を設けた場合の桁1、桁2の応答

2 の速度ベクトルが反対方向で、正面衝突し、衝突後の桁1と桁2の速度ベクトルが互いに反転する。3回目の衝突では、衝突前の桁1と桁2の速度ベクトルが反対方向で、正面衝突し、衝突した後、桁2の速度ベクトルのみが反転し、桁1の速度ベクトルは衝突前と同方向で減速する。つまり、6回の衝突は、まず、追突型と正面衝突型の2通りに大別でき、

さらに正面衝突型は衝突後の桁1と桁2の応答速度のベクトルが逆方向となる場合と同方向となる場合の2通りの衝突形態となる。

4. ゴム製緩衝装置を用いた場合の桁間衝突の低減効果

表-3 桁1と桁2の最大応答変位(mm)および平滑化度係数 K

		桁1	桁2	平滑化度係数
緩衝装置を設けない場合	衝突しない場合	4.75	14.14	2.98
	衝突する場合	5.69	10.67	1.88
緩衝装置を設けた場合		4.82	6.27	1.3

ゴム製緩衝装置を桁間に設けた場合の桁 1 と桁 2 の応答加速度、応答変位、桁 1—桁 2 間の相対変位を図-8 に示す。なお、緩衝装置を設ける場合には、緩衝装置の作動距離 u_G と桁遊間 u_C の関係を、桁間衝突が生じる前に緩衝装置が作動すべきであることから、緩衝装置の厚さを h として、

$$u_G = u_C - h \quad (4)$$

とした。いま、緩衝装置の厚さは $h = 5\text{mm}$ であるから、桁遊間が $u_C = 7.05\text{mm}$ の場合、緩衝装置の作動距離 u_G は 2mm 程度である。

緩衝装置を設けることにより、応答加速度が桁 1、桁 2 で $0.62g$ 、 $0.76g$ まで低減し、応答変位は桁 1 と桁 2 で 4.8mm 、 6.3mm まで低減している。ここで、衝突しない場合、緩衝装置を設けない場合、緩衝装置を設ける場合に対して、桁 1 と桁 2 の応答変位および桁変位の平滑化度係数 κ を求めると表-3 のようになる。緩衝装置を設けると、緩衝装置を設けない場合より、平滑化指標 κ が 1 に近づいており、桁 1 と桁 2 の応答変位の平滑化が進んでいることがわかる。隣接桁の応答変位の平滑化が進み、2 つの桁が 1 つの連続橋のように応答すれば、桁かかり長からの脱落や落橋などの大きな被害を回避することが可能となり、地震応答を低減することができる。このような緩衝装置による平滑化効果は、緩衝装置が変位ストッパーして機能することを意味するので、緩衝装置は桁の応答変位を抑える上で適していると言える。

5. 結論

本研究では、固有周期が異なる 2 連の桁橋の桁端部にゴム製緩衝装置を設置し、振動台実験を行い、それらによる桁間衝突に対する緩衝効果について検討を行った。本実験から得られた知見をまとめると以下の通りである。

1) ゴム製緩衝装置を設けない場合に衝突が生じると、桁 1 で $2.20g$ 、桁 2 で $1.14g$ のパルス上の大きな応答加速度が生じる。また、衝突により、固有周期の

短い桁 1 の応答変位は増加し、固有周期の長い桁 2 の応答変位は減少する。衝突による桁の応答変位の平滑化の度合いを式(1)により平滑化度係数 κ で評価すると、衝突が起こらない場合には 2.98 であったものが衝突が起こった場合には 1.88 と小さくなり、衝突が 2 連の桁の応答変位を平滑化させる方向に作用する。

2) 緩衝装置を設けると、緩衝装置を設けない場合より、平滑化指標 κ が 1 に近づき、桁 1 と桁 2 の応答変位の平滑化がさらに進む。応答変位の平滑化が進むと、あたかも 2 つの桁が連結され、1 つの連続橋のように応答し、緩衝装置が変位ストッパーとして機能するため、桁の応答変位を抑える上で好ましい。

謝辞

本実験に際して、ゴム製緩衝装置の製作にあたっては(株)横浜ゴムの黒田益夫課長、島ノ江哲氏に大変お世話になりました。ここに、記して厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) Skinner, I., Robinson, W. H. and McVerry, G. H.: An Introduction to Seismic Isolation, John Wiley & Sons, USA, 1993, 川島一彦, 北川良和監訳: 免震設計入門, 鹿島出版会, 1996
- 2) 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
- 3) 庄司学, 川島一彦, 渡邊学歩, 河野哲也: 高面圧下におけるゴム製緩衝装置の地震時繰り返し圧縮特性, 第 53 回年次学術講演会講演概要集, 1998.10
- 4) 伊津野和行, 児島孝之, 鈴木亮介, 和田教志, 吉野伸: ゴム材の圧縮変形を利用した反力分散装置のハイブリッド地震応答実験, 土木学会論文集, No.598/I-44, pp.299-309, 1998.7