

ゴム製緩衝装置とダンパーによる桁間衝突の低減効果

植原健治¹・川島一彦²・庄司学³

¹ 学生会員 東京工業大学大学院修士課程 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)

² フェロー会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (同上)

³ 正会員 工修 東京工業大学助手 工学部土木工学科 (同上)

1. はじめに

1995 年兵庫県南部地震では、隣接する桁間に生じた衝突や桁間連結装置を介して一方の桁から隣接する桁に伝達された地震力により被害を受けた橋が多数確認されている。

兵庫県南部地震以降採用されている地震力分散方式の橋梁では、積層ゴム支承を設けることによって多径間の弾性支持をはかり、上下部構造間に相対変位を許容することにより上下部構造の被害を軽減することができる。しかし、固有周期が延びるため、桁の応答変位が増大し隣接桁間や桁～橋台間に衝突が生じる可能性がある。

本研究では、ゴム製緩衝装置と同時に桁間の緩衝機能を持たせるためにダンパーを用いた場合の効果を実験振動実験によって検討すると同時に、非線形動的解析によってモデル化の適用性を検討したので、この結果を報告する。

2. 実験模型橋および振動台実験

本実験では、図 1 に示すように鋼材(SS400)で作成した質量の異なる 2 連の単純桁橋を使用した。模型を設計する際の基本方針は、桁間の非線形性等、相似率に基づいて小型の模型実験から実橋の動的応答を正しく推定することは容易ではないため、模型橋を小さな実橋と考え、動的解析の適用性を検討するための実験データを提供することに重点を置くという点である。このため、相似率に基づいて質量比や加速度比を定めるのではなく実際の高架橋と同程度の 0.5 秒程度の基本固有周期を有するように模型橋の桁質量や橋脚の剛性を定めることとした。鋼材

表-1 模型橋の特性

桁1			桁2		
桁厚	固有周期 (sec)	減衰定数	桁厚	固有周期 (sec)	減衰定数
9mm桁	0.36	0.048	9mm桁	0.43	0.054
			44mm桁	0.72	0.082

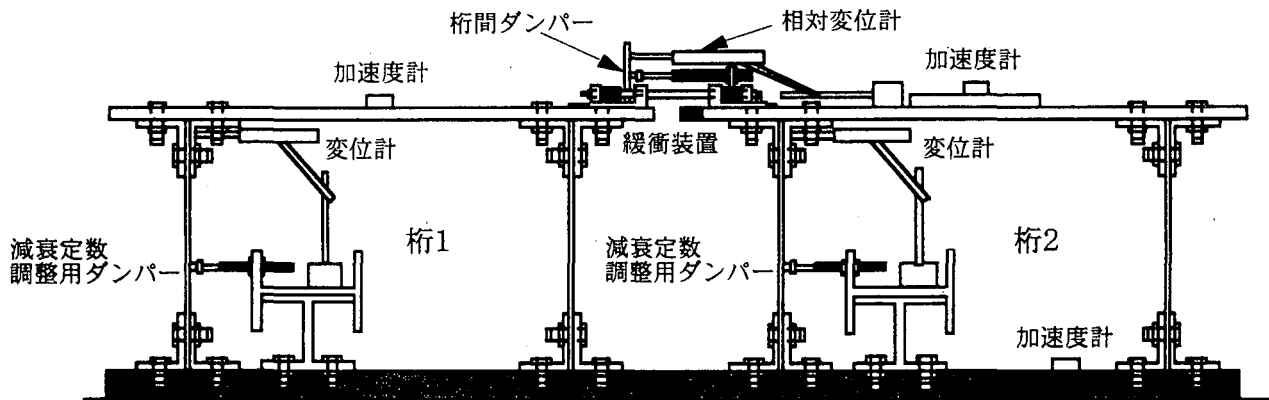


図1 実験模型橋

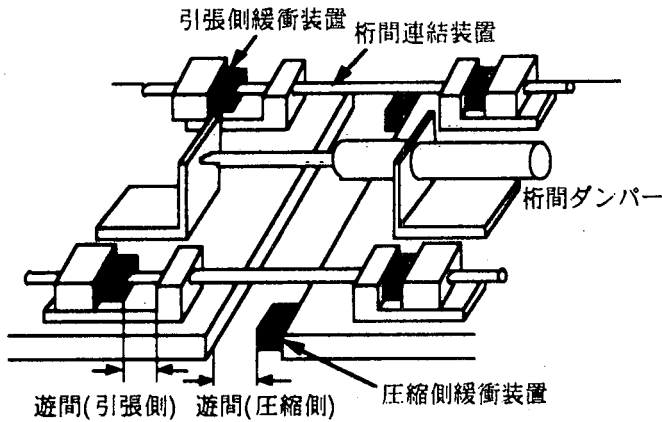


図2 緩衝装置および桁間ダンパー

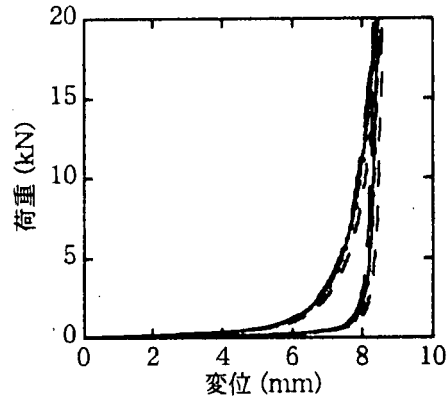


図3 緩衝装置の圧縮特性

表-2 実験ケース

模型 、タイプ	ケース	桁の遊間(mm)		緩衝装置		桁間ダンパー
	No.	圧縮側	引張側	圧縮側	引張側	
9-9mm模型	1	2.5	-	-	-	-
	2	3.8	-	○	-	-
	3	3.5	-	○	-	d1
	4	3.7	-	○	-	d2
	5	3.7	4.0	○	○	d1
9-44mm模型	6	2.5	3.5	○	○	-

で模型橋を製作すると減衰が小さくなりやすいが、減衰が小さいと極端な応答となる場合があるため、一般の高架橋と同程度の 0.05 程度の減衰を有するように、橋脚に粘性ダンパーを取り付けた。橋脚は弾性状態にある状態で加振実験することとした。これは、実橋では落橋防止装置が機能するような段階では当然橋脚も塑性ヒンジ化していると考えられるが、小規模な模型で橋脚の塑性化の影響までを再現することは困難であるため、この効果は別途解析で検討すべきと考えたためである。

桁は 2 連とも長さ 1000mm、幅 300mm の矩形であり、一方の桁の厚さを 9mm に固定し(以下、この桁を桁 1 と呼ぶ)、他方の桁(以下、この桁を桁 2 と呼ぶ)の厚さを 9mm、44mm と変化させた。以下、これらを 9mm 桁、44mm 桁と呼ぶ。また、一方が 9mm 桁で、他方も 9mm 桁から構成される模型を 9-9mm 模型、他方が 44mm 桁から構成される模型を 9-44mm 模型と呼ぶ。ただし、9-9 模型の場合には、2 つの桁に 20% 程度固有周期差が生じるように、桁 2 には重りを取り付けた。自由振動実験から求めた各桁の振動特性を表 1 に示す。

図 2 に示すように、緩衝装置として桁間が開じる方向(圧縮側)に変位した場合に作動する装置(以下、圧縮側緩衝装置と呼ぶ)と、開く方向(引張側)に変位した場合に作動する装置(以下、桁間連結装置と呼

ぶ)の 2 種類を用い、それぞれ桁の端部(橋軸直角方向)に取り付けた。桁間連結装置は、鋼棒と引張側緩衝装置から構成される。圧縮側および引張側緩衝装置は、ともに積層ゴム支承などに用いられる天然ゴム(硬度は 57Hs、伸びは 490%、引張強さは 175kgf/cm²、圧縮永久ひずみ率は 20%)を用いて制作した。圧縮側緩衝装置は断面が 15mm×9mm、長さが 10mm の立方体であり、引張側緩衝装置は 15mm×12mm、長さが 10mm の立方体である。引張側緩衝装置には鋼棒が貫通しているので、衝突時の受圧面積を同じにするために鋼棒の断面積だけ圧縮側緩衝装置よりも寸法が大きくなっている。

圧縮側緩衝装置に対して、5 回の繰返し圧縮載荷実験を行った結果を図 3 に示す。これは、立方体の一面を鋼材に固定し、他の 5 面を自由として載荷した場合である。載荷面には摩擦の影響を小さくするためにグリースを塗る等の特別な措置は施していない。ひずみが 80% になるとゴムのひずみ硬化により剛性は初期剛性の約 200 倍と非常に大きくなる。ただし、本実験ではゴムのひずみは最大でも 20% 程度であり、ひずみ硬化が卓越する領域には達していない。

また、ゴム製緩衝装置と併せて桁間の緩衝機能を持たせるためにダンパー(以下、桁間ダンパーと呼ぶ)を設置した。桁間ダンパーは桁間が開じる方向

に動くときにエネルギー吸収する。ここでは、粘性係数が 0.038kN/m のダンパー (d1) と粘性 0.073kN/m のダンパー (d2) の 2 種類を使用した。

入力地震動としては、1995 年兵庫県南部地震の際に神戸海洋気象台で観測された NS 成分の振幅を小さくした波形を用いた。

3. 振動台実験による模型橋の地震応答特性

圧縮側・引張側緩衝装置およびダンパーの組み合わせを変えて、これらによる桁間衝突の低減効果について検討した。ゴム製緩衝装置やダンパーの効果を定量化するために、2 連の桁の応答変位の平滑度係数を以下のように定義する。

$$\kappa \equiv \frac{|\mu_2|}{|\mu_1|} \quad (1)$$

ここで、 $|\mu_1|$ 、 $|\mu_2|$ はそれぞれ桁 1、桁 2 の最大応答変位の絶対値である。桁の応答変位が平滑化されるということは、2 つの桁が連続橋のように応答することを意味し、桁かかり部からの落橋を防ぐ上で有効である。表 2 に実験ケースを示す。ここで、桁の遊間は、桁の両端(橋軸直角方向)で同一ではないが、これらのおおよその平均値を示した値である。

(1) 圧縮側緩衝装置の効果

圧縮側緩衝装置の効果を検討するために、圧縮側緩衝装置を設置していないケース 1 とこれを設置したケース 2 の応答を示すと、それぞれ図 4、図 5 のようになる。これによると、ケース 1、ケース 2 とともに桁 1 ではマイナス側に、桁 2 ではプラス側にスパイク状の大きな応答加速度が生じている。また、桁間相対変位は、遊間に抑えられている。これは、この位置で桁どうしの衝突が生じたためである。振動実験では、桁間の衝突は桁の端面で全体として生じるだけでなく、桁の一部の端の端面で生じる場合もある。

衝突に伴う桁の応答加速度は、ケース 1 では桁 1、桁 2 においてそれぞれ 2.82g、2.76g に達するのに対して、ケース 2 では桁 1、桁 2 においてそれぞれ 0.62g、0.78g とケース 1 の 1/3.5~1/4.6 に低下している。これは、圧縮側緩衝装置が桁間の衝突を緩和したためである。最大応答変位を比較すると、ケース 1 では桁 1、桁 2 においてそれぞれ 12.0mm、14.9mm であるのに対し、ケース 2 では桁 1、桁 2 においてそれぞれ 10.4mm、15.9mm と大きく変

わっていない。したがって、今回用いた圧縮側緩衝装置は桁の最大応答加速度を減少させるためには有効であるが、桁の応答変位を減少させるために大きな効果があるわけではない。

図 4、5 には桁 1、桁 2 が衝突した時刻を示しているが、これによれば、衝突が起こるのは桁 1、桁 2 の変位が互いに近づく方向に最大変位となった瞬間ではない。例えば、図 5 において 3~4 秒間の応答を示すと図 6 のようになり、3.23 秒で桁 1 の変位は -8.03mm (図 1 において左側の変位) と最小値となった後、桁変位が -3.43mm と戻り始めた 3.30 秒に桁 2 と衝突している。これを桁 2 側から見ると、3.29 秒で応答変位は -8.58mm と最小値となり、桁変位が -8.05mm まで戻った 3.30 秒に桁 1 と衝突している。これは、桁 1 が桁 2 に追突する形で衝突が起こったことを示している。また、3.64 秒においても桁 1、桁 2 間で衝突が生じているが、衝突が起こったのは、桁 1 においては 3.70 秒で -10.0mm と最小変位に達する前に、また、桁 2 においては 3.67 秒で -11.4mm と最小変位に達する前に、桁 2 が桁 1 に追突する形で衝突が起こっている。このように、いずれも桁 1、桁 2 がそれぞれ追突する形で衝突するのは、2 つの桁の固有周期が近いためである。

(2) 桁間ダンパーの効果

圧縮側緩衝装置を設けたケース 2 の応答は図 5 に示した通りであるが、これに粘性係数の小さい桁間ダンパー (d1) を設置した場合と、粘性係数の大きい桁間ダンパー (d2) を設置した場合の応答を示すと、それぞれ図 7、図 8 のようになる。これによれば、桁 1、桁 2 の最大変位はケース 3 ではそれぞれ 12.1mm、14.9mm、ケース 4 では 12.9mm、15.0mm となる。ケース 2 における桁 1、桁 2 の最大変位はそれぞれ 10.4mm、15.9mm であったから、桁 1 の最大変位は大きくなるのに対して、桁 2 の最大変位は小さくなる。これを式(1)の平滑度係数で表すと、ケース 2 では 1.52 であるのに対して、ケース 3 では 1.23、ケース 4 では 1.17 と桁の応答が平滑化されていくことがわかる。これは、ダンパーを設置することにより、桁 1、桁 2 間で減衰力が伝えられる結果、もともと応答変位の小さい桁 1 の応答変位が増加し、応答変位の大きい桁 2 の応答変位は減少するためである。すなわちダンパーの設置は、桁の平滑化に有効であることがわかる。

桁の最大加速度を比較すると、桁 1、桁 2 においてケース 3 ではそれぞれ 0.51g、0.80g、ケース 4 ではそれぞれ 0.38g、0.46g であり、ケース 2 の

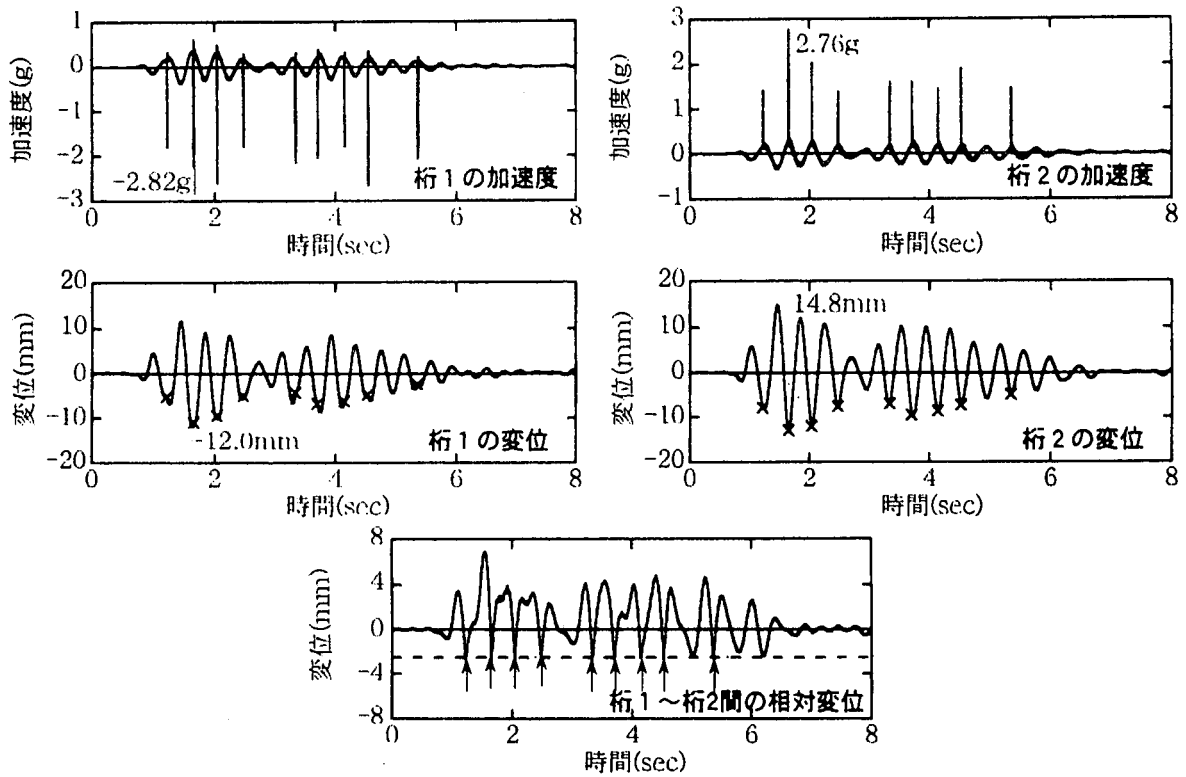


図4 ゴム製緩衝装置および桁間ダンパーを設けない場合(ケース1)

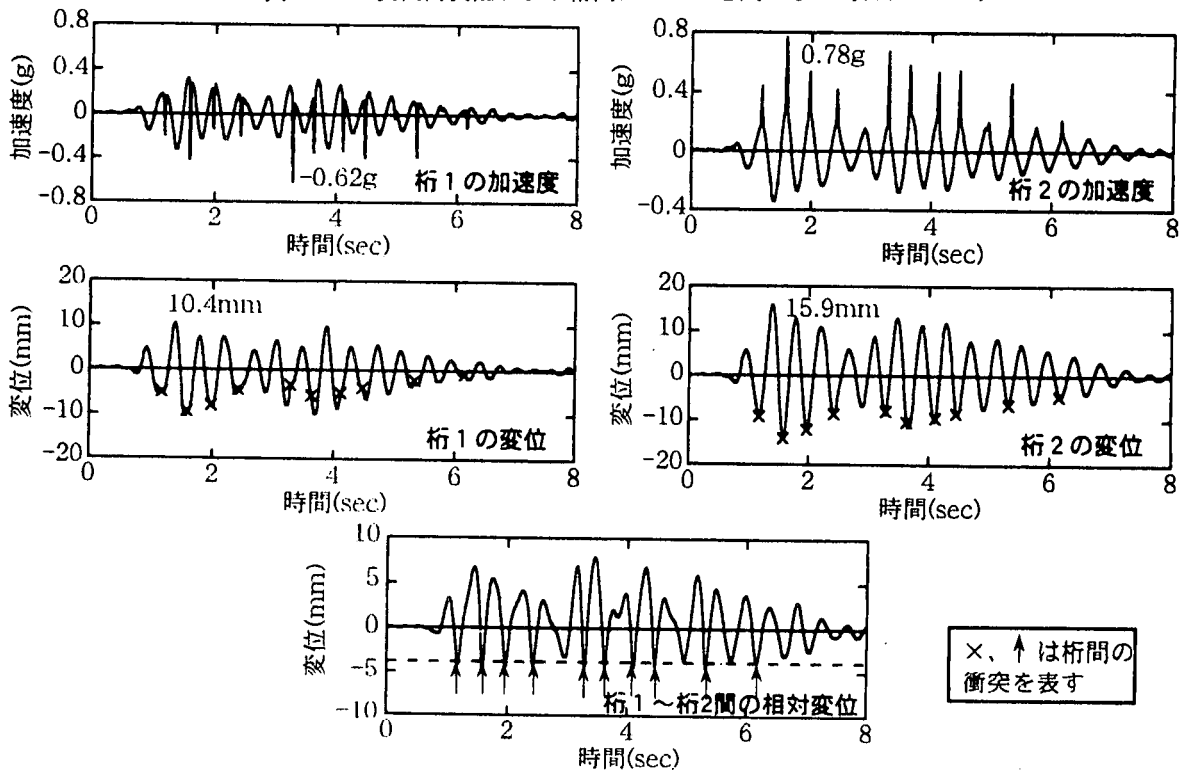


図5 圧縮側緩衝装置を設けた場合(ケース2)

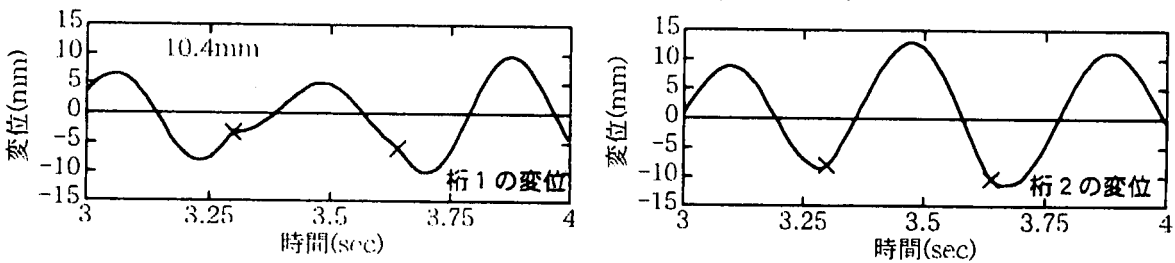


図6 衝突時の応答変位

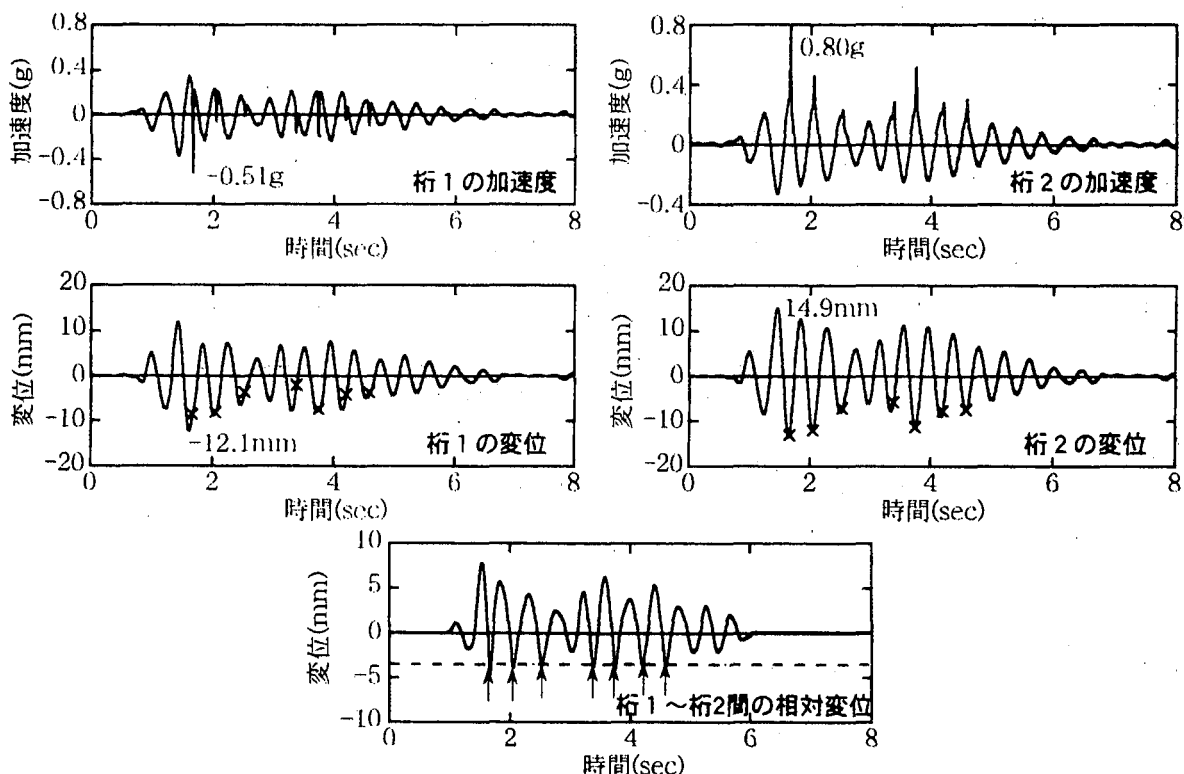


図7 圧縮側緩衝装置および桁間ダンパー(d1)を設けた場合(ケース3)

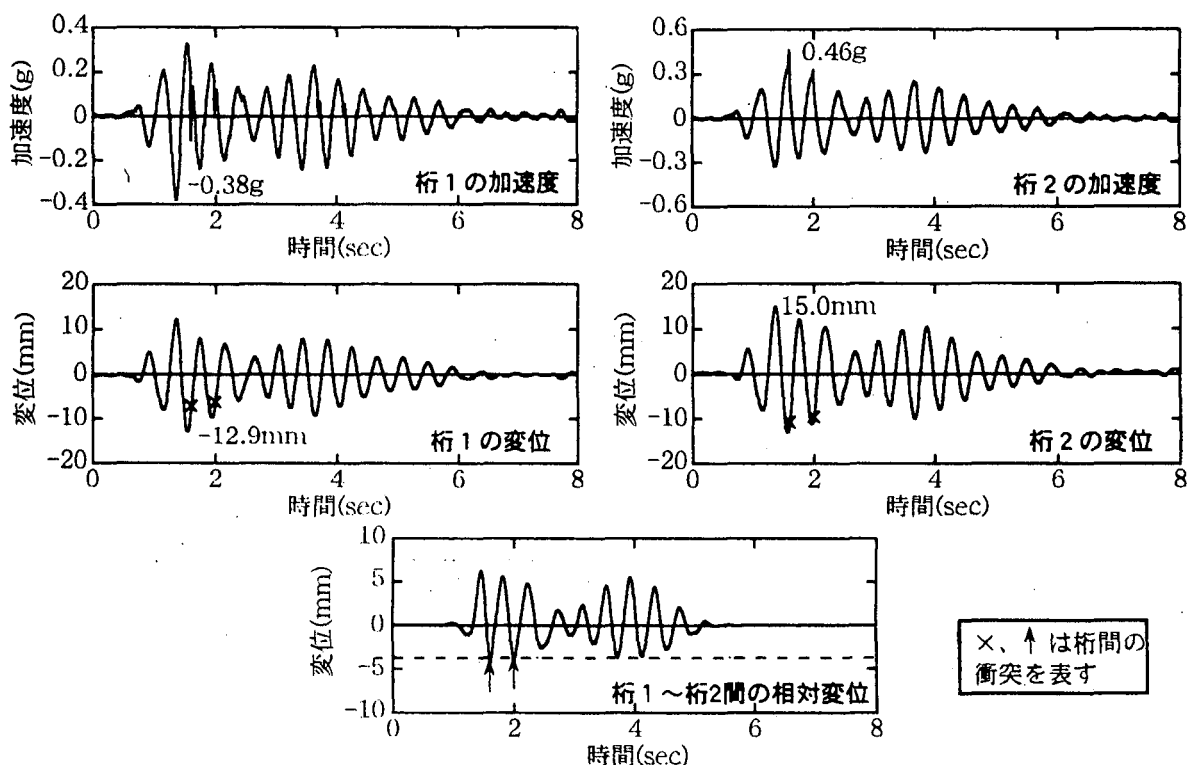


図8 圧縮側緩衝装置および桁間ダンパー(d2)を設けた場合(ケース4)

0.62g、0.78g に比較して、ケース 3 では $1/0.98 \sim 1/1.22$ 、ケース 4 では $1/1.63 \sim 1/1.70$ と一般に小さくなっている。桁間ダンパーを設置することは、最大加速度を低減するのに有効である。

(3) 桁間連結装置の効果

圧縮側緩衝装置と同時に桁間連結装置を設置した

ケース 5 の実験結果を図 9 に示す。上述した桁間連結装置を設置していないケース 1～4 と比較すると、桁間に生じる相対変位は、桁間が閉じる方向だけでなく、桁間が開く方向にも抑えられている。また、桁 1 ではマイナス側に加えてプラス側にも、桁 2 ではプラス側に加えてマイナス側にもそれぞれスパイク状の応答加速度が生じている。これらは、桁

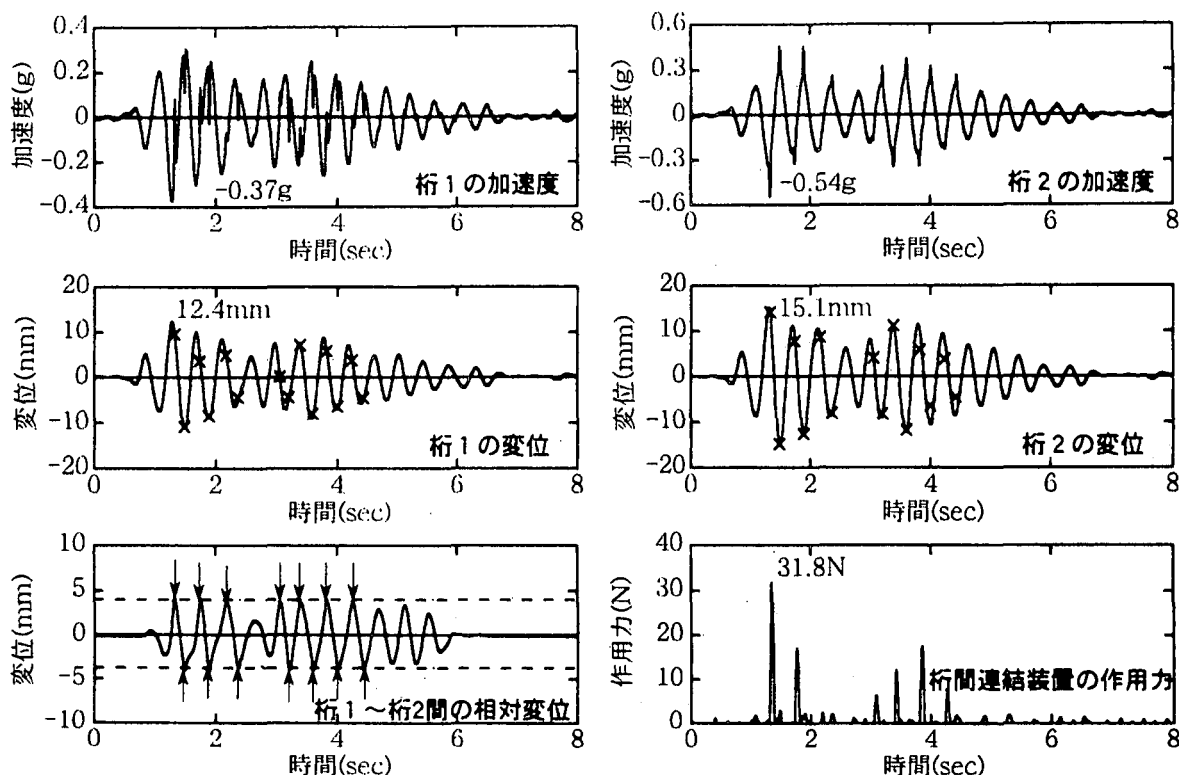


図9 圧縮側・引張側緩衝装置および桁間ダンパー(d1)を設けた場合(ケース5)

の開き量が 4mm に達した段階で桁間連結装置が作動するためである。

また、桁間連結装置を設置したケース 5 とこれを設置していないケース 3 の応答加速度を比較すると、ケース 3 では桁 1、桁 2 でそれぞれ 0.51g、0.80g であったのに対し、ケース 5 では桁 1、桁 2 の応答加速度はそれぞれ 0.37g、0.54g とケース 3 の 1/1.37～1/1.48 に低減している。これから、桁間連結装置は桁の応答加速度を低減させる上で有効なことがわかる。桁間連結装置に作用する作用力は、最大で 31.8(N)であり、これは桁 1 の桁重量の 0.15 倍程度に相当する。

4. 非線形動的解析による模型橋の解析

模型橋の地震応答特性を解析的に検討するために、図 10 のように 2 次元離散型骨組構造にモデル化した。桁および橋脚は線形はり要素とした。桁間の衝突は図 11 に示すように衝突ばねを用いてモデル化することとし、衝突ばねの剛性 k_i 、衝突力 F_i を以下のように与えた。

$$k_i = \begin{cases} \tilde{k}_{i1} \cdots \Delta u < -u_{G1} \\ 0 \cdots -u_{G1} \leq \Delta u \leq u_{G2} \\ \tilde{k}_{i2} \cdots u_{G2} < \Delta u \end{cases} \quad (2)$$

$$F_i = \begin{cases} \tilde{k}_{i1}(\Delta u - u_{G1}) \cdots \Delta u < -u_{G1} \\ 0 \cdots -u_{G1} \leq \Delta u \leq u_{G2} \\ \tilde{k}_{i2}(\Delta u - u_{G2}) \cdots u_{G2} < \Delta u \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $\tilde{k}_i$ ：衝突ばね定数、 u_{G1} 、 u_{G2} ：圧縮側および引張側の遊間、 Δu ：桁 1、桁 2 間の相対変位で次式で与えられる。

$$\Delta u = u_2 - u_1 \quad (4)$$

ここで、 u_1 、 u_2 は桁 1、桁 2 の応答変位である。振動実験では u_{G1} 、 u_{G2} は桁の両端(橋軸直角方向)で必ずしも同じではないため、本来は衝突ばねを桁の両端に設置する必要がある。しかし、遊間の測定にも誤差が生じることから、ここでは桁の両端での遊間の平均値を u_{G1} 、 u_{G2} とすることとする。桁間ダンパーはダッシュポットを用いてモデル化した。

解析の重点を衝突ばねによる桁間衝突の再現性に置き、模型橋の固有周期や減衰定数、桁の遊間、緩衝装置のゴム剛性は実験結果と一致するように多少調整して非線形動的解析を行った。

9-9mm 桁に圧縮側+引張側緩衝装置と桁間ダンパー(d1)を設置したケース 5 および 9-44mm 模型に圧縮側+引張側緩衝装置を設けたケース 6 の解析

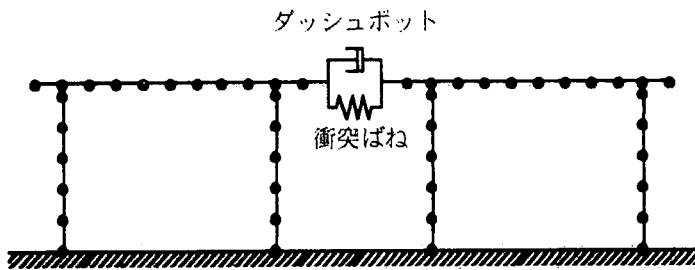


図10 骨組構造モデル

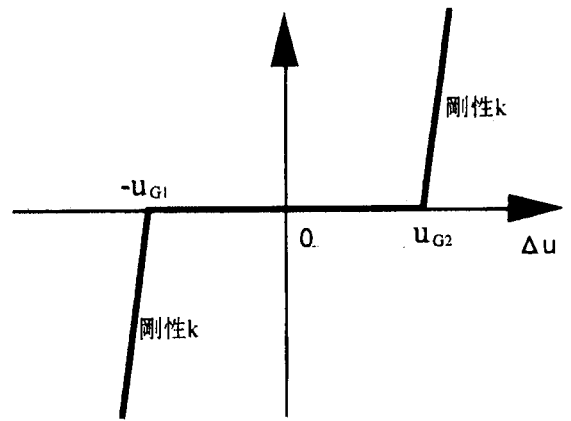


図11 緩衝装置のばね剛性

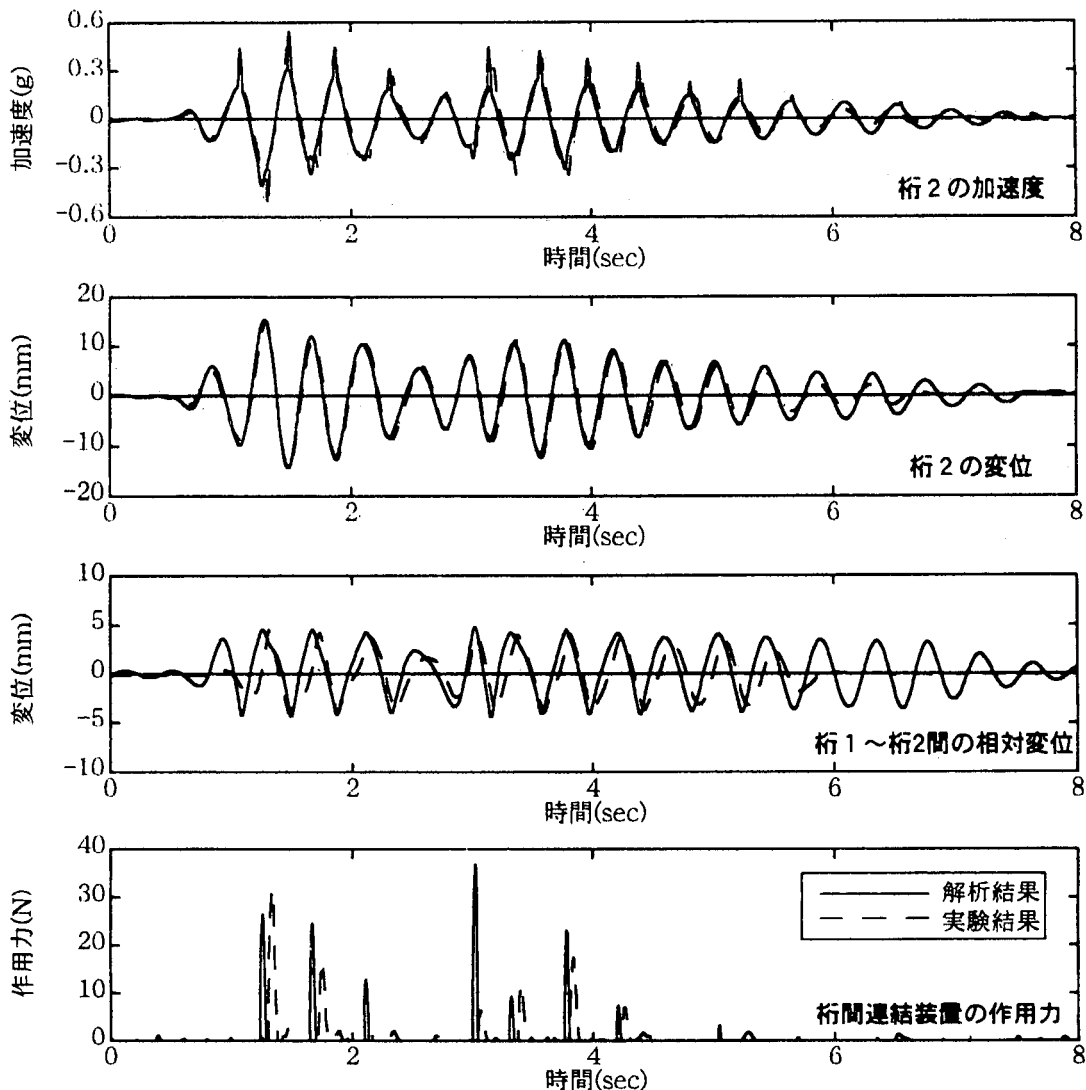


図12 圧縮側・引張側緩衝装置および桁間ダンパー(d1)を設けた場合(ケース5)の実験結果と解析結果の比較

結果を実験結果と比較して示すとそれぞれ図 12、図 13 のようになる。これによれば、桁の応答変位のみならず、桁の応答加速度についても、良く振動実験の特徴を再現していることがわかる。特に衝突時の桁の応答加速度の変化については、微妙な特徴を良く現している。

しかし、桁間の相対変位や桁間連結装置に作用する引張力については、これよりも解析精度は一段低くなっている。例えば、桁間連結装置が作動する時間にずれが生じている。また、ケース 5 において桁間連結装置に作用する引張力を比較すると、1.3 秒付近では 31.76N(実験)～26.46N(解析)と、かなり近

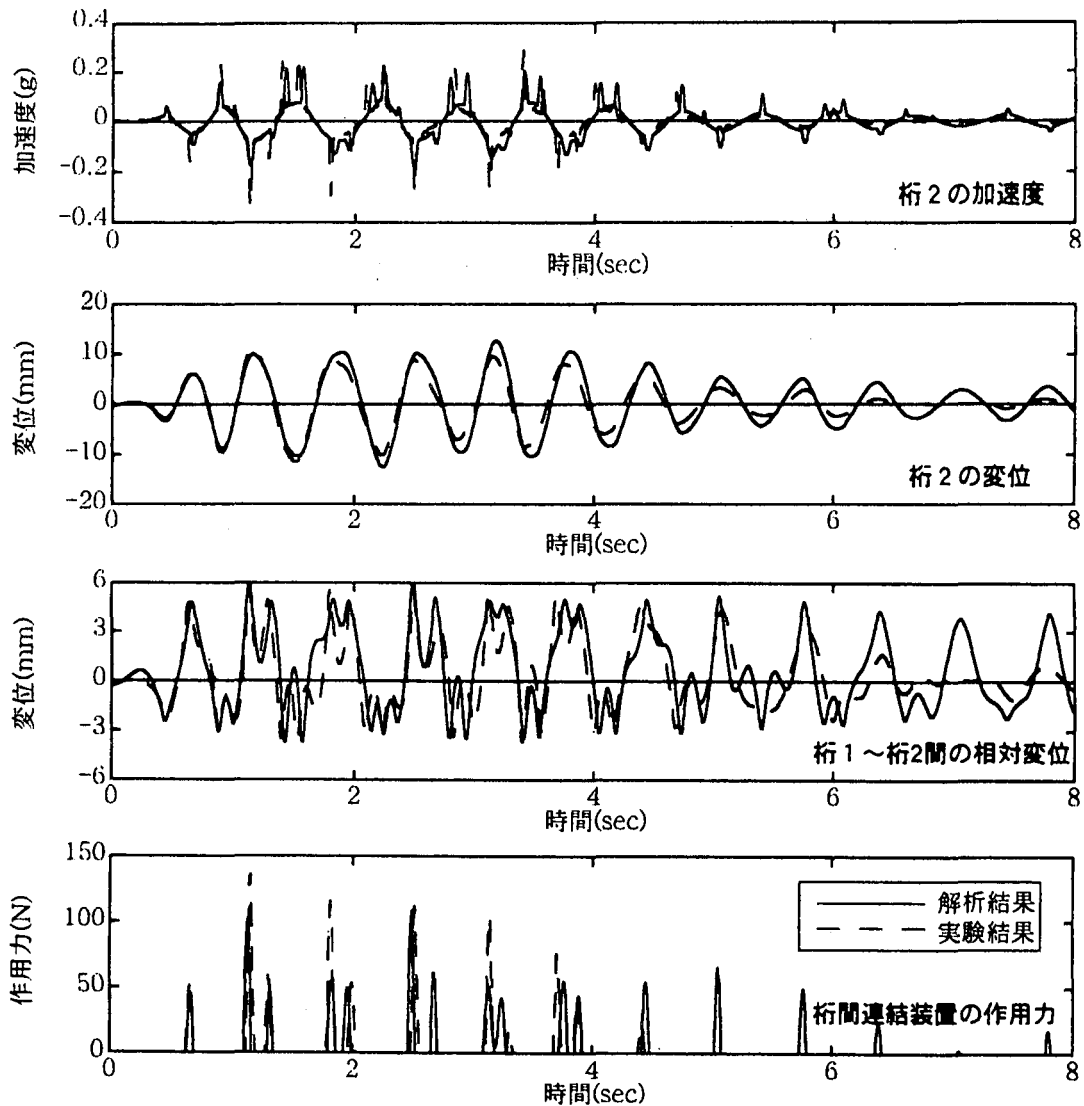


図13 9-44mm桁に圧縮側・引張側緩衝装置を設けた場合
(ケース6)の実験結果と解析結果の比較

い値となっているのに対し、3.1秒付近では6.4N(実験)～37.0N(解析)と、大きく異なる場合もある。これには、桁端の2カ所で生じる衝突を解析では1カ所の衝突としてモデル化していること、遊間の設定等に問題があるのではないかと推測される。

5. 結論

緩衝装置およびダンパーの組み合わせを変えて振動台実験を行った。また、模型橋に対する非線形動的解析を行い、衝突ばねによる桁間衝突の解析精度について検討した。本研究から得られた結論は以下の通りである。

(1) 圧縮側・引張側緩衝装置は桁の衝突時に生じる応答加速度を大きく低減する効果があり、桁間連結装置は桁間の過度な開きを抑える効果がある。

(2) より大きな粘性係数のダンパーを設置することにより桁の応答変位を平滑化したり、最大応答加

速度を低減することができる。

(3) 衝突ばねやダッシュポットによってモデル化して行った非線形動的解析は、桁の応答加速度や応答変位について実験結果を精度良く再現することができる。ただし、桁間連結装置の作用力や、桁間相対変位の再現精度はこれよりも1段低くなる。

参考文献

- 1) 川島一彦：動的解析における衝突のモデル化に関する一考察、土木学会論文集、第308号、pp.123-126、1981
- 2) 星恵津子、川島一彦、庄司学：桁間衝突を緩和させるための圧縮側および引張側緩衝装置の有効性に関する研究、第3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.233-236、1999.12