

桁間衝突が落橋におよぼす影響 に関する実験的検討

森山卓郎¹・依田照彦²

¹正会員 工修 阿南工業高等専門学校講師 建設システム工学科
(〒774-0017 徳島県阿南市見能林町青木265)

²正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

本研究は、兵庫県南部地震で実際に被災した橋梁をモデルに縮小した2径間の橋梁模型を製作し、2次元振動台を用いて振動させたときの橋桁や橋脚の動的応答から桁間衝突による落橋のメカニズムを調べたものである。まず、落橋防止連結板を取り付けていない場合について、桁の衝突による落橋の有無を観察し、桁間衝突が落橋におよぼす影響について検討した。その結果、橋桁の落下には橋脚を中心とした設計振動単位の共振現象が強く影響することが確認できた。さらに、落橋防止連結板に緩衝材を挿入し、それによって衝撃的な外力を吸収できるかどうかを検討し、緩衝材として望ましい材料特性について検討した。

Key Words : *pounding of girders, bridge restrainer plates, impact force, shock absorber*

1. はじめに

1995年1月に発生した兵庫県南部地震以後、橋梁に免震支承や積層ゴム支承を使用することにより地震力の低減が図られているものの、桁の応答変位が増大するために橋桁間の衝突が起こる可能性も無視できない。桁間衝突により橋桁が落下する可能性もあり、桁間衝突の影響を緩和する対策を講ずることは急務であると考えられている。また、従来振動単位ごとに設計されていた橋脚が落橋防止連結板を取り付けることによって、隣接橋脚同士で相互に影響を及ぼし合うことが考えられるために、こうした影響を考慮した設計手法を確立する必要性も指摘されている¹⁾。しかしながら、このような桁間衝突の影響についての理論的なアプローチは難しく、実験的に調べた研究も少ないのが現状である^{2),3)}。

さらに、兵庫県南部地震では、衝撃的な外力によって落橋防止連結板が破壊し、橋桁が落下した事故も見られた。この場合においても、落橋防止連結板の破壊後に橋桁が衝突して落橋したと考えられる事例もあり、桁間衝突の回避は急務である。落橋防止連結板の破壊を防止する策としては現在、連結板にスリットを入れることによってエネルギー吸収能を高めることや^{4),5)}、連結板の形状や板厚の改良⁶⁾、緩衝材を連結板に挿入し耐衝撃性を持たせて外力を吸収させることが考えられ

ている^{9)~11)}。耐衝撃性を向上させるためには、比較的剛性の高いものを緩衝材として用いることが望ましいという報告もあり、繊維で補強したゴムを落橋防止連結装置のピンの周りに巻きつけたもの^{6)~8)}が既に一部で実用化されている。

本研究では、兵庫県南部地震で実際に被災した阪神高速道路3号神戸線の高架橋の一部を1/100に縮小して2径間の橋梁模型を製作し、2次元振動台を用いてサイン波および地震波を橋脚模型の橋軸水平方向に入力し、動的応答現象を観察した。まず、橋桁の応答加速度から衝撃力の有無を調べ、橋桁同士の衝突現象について検討した。次に、橋梁模型に入力したサイン波の振幅や周波数を変化させることにより、落橋に及ぼす入力波の周波数について検討し、落橋のメカニズムについて考察した。これらについてはいずれも、落橋防止連結板を取り付けない場合と取り付けた場合について実験を行い、落橋防止連結板の有効性についての検討も行った。落橋防止連結板を取り付けない場合における検討は、地震動によって連結板が破壊された後の動的挙動を調べるために行ったものである。さらに、落橋防止連結板に緩衝材を挿入したものを製作し、耐衝撃性を向上させるために緩衝材として望ましい材料特性について検討した。

2. 実験方法

(1) 橋梁模型の製作

模型実験で得られた結果を実構造物で活用するためには相似則を考慮しなくてはならない¹²⁾。橋桁落下の主な原因が桁間衝突にあり、桁間衝突が共振現象と結びついているとの判断の下に、本研究では共振現象を生じさせることを目的として、入力する波の卓越周波数と模型の固有振動数がほぼ等しくなるように模型を設計した。この相似則の適用にあたっては、橋軸方向の地動による振動現象と衝突による衝撃現象の両者を考慮できる最小単位として2径間の橋梁模型を取り上げ、落橋が橋梁の固有振動数と地震時の入力波の卓越周波数に大きく依存することを考え、実橋・実地震時との相似条件を考慮した。

実構造物の長さを l とし、模型の長さを l^* とする。実構造物に入力するサイン波の振幅を A 、模型に入力する波形の振幅を A^* とする。模型の物理量に対する実構造物の物理量の比を $q^*(=q/q^*)$ とすると、

$$l^* = A^* \quad (1)$$

としなければならない。実構造物の入力波の加速度を a 、周波数を f とし、模型の入力波形の加速度を a^* 、周波数を f^* とするとこれらの比は、

$$a^* = A^* f^{*2} \quad (2)$$

と表されるので、

$$a^* = l^* f^{*2} \quad (3)$$

より、

$$f^* = \sqrt{\frac{a^*}{l^*}} \quad (4)$$

を得る。一方、道路橋示方書¹³⁾の簡易な固有周期 T の算定方法から、変位を δ とすると、

$$T = 2.01\sqrt{\delta} \quad (5)$$

が利用できる。実構造物と模型の固有周期の比は、

$$T^* = \sqrt{\delta^*} \quad (6)$$

となる。したがって、 $\delta^* = l^*$ であるので、

$$T^* = \sqrt{l^*} \quad (7)$$

を用いて、固有振動数 F の比は、

$$F^* = \frac{1}{T^*} = \frac{1}{\sqrt{l^*}} \quad (8)$$

と表される。共振現象を生じさせる条件として $f^* = F^*$ が必要となるので、式(4)と式(8)を等値して、

$$\sqrt{\frac{a^*}{l^*}} = \frac{1}{\sqrt{l^*}} \quad (9)$$

を得る。ゆえに、 t を時刻として、

$$a^* = \frac{l^*}{t^{*2}} = 1 \quad (10)$$

を満たさなければならないことがわかる。式(10)は式(9)からだけでなく式(7)からも導かれる。

本実験では、兵庫県南部地震によって実際に被災した阪神高速3号神戸線札場地区の高架橋を参考に、2次元振動台の性能を考慮した上で、スパン、幅、および高さを100分の1 ($l^* = 100$) に縮小し、固有振動数を調節した2径間の橋梁模型を鋼材(SS400)を用いて製作した¹⁴⁾。単純化するため、実際の4径間のうちの被災した中央2径間をモデル化した。減衰定数は実橋とほぼ同じ0.03になるようにした。橋脚については、矩形の中実断面鋼部材とし、曲げ剛性を調節したため厚さは100分の1とはしていない。また、模型のサイズが小さいため、支承の構造については考慮していない。橋桁の遊間については、実際の橋梁の100分の1とし、桁かかり長については、道路橋示方書において支間長から求まる桁かかり長のほぼ100分の1となるようにした。

この橋梁模型に、サイン波および地震波を入力した。式(7)をもとに相似則を考え、入力する地震波の卓越周波数、および模型の固有振動数を実構造物のほぼ10倍となるよう地震波の修正および模型の設計を行った。地震波については、式(1)、式(10)を用いて加速度の大きさを変えず、振幅を1/100、時間軸を1/10とした。

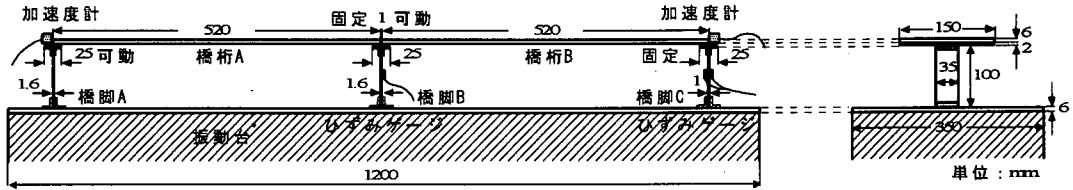


図-1 橋梁模型の形状および寸法

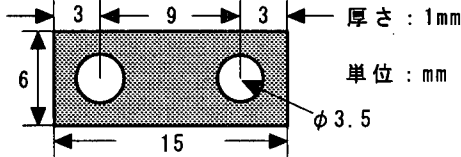


図-2 落橋防止連結板の形状および寸法

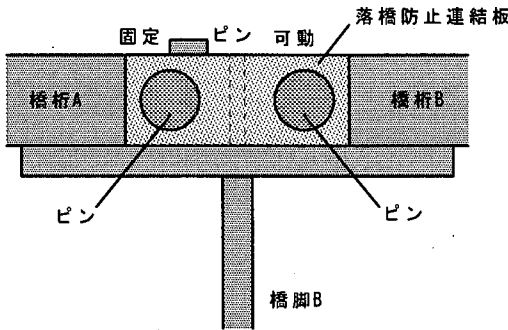


図-3 落橋防止連結板の取り付け方法

(2) 橋脚模型の共振周波数の測定

橋梁模型は衝突の生じる最小単位の2径間とした。隣接している他の橋桁の重量やその影響については考慮していない。ただし、橋脚の固有振動数を変えるために、3本の橋脚のうちの1本の厚さを変えることにより剛性を変化させている。橋桁Aは橋脚B上で固定支持とし、橋脚A上で可動支持とした。また、橋桁Bは橋脚C上で固定支持とし、橋脚B上で可動支持とした。固定支持については、橋桁と桁かかり部分でピンによって固定し、固定支承が破壊される状態は想定していない。可動支持については、橋桁と桁かかり部分の間の摩擦を減らすことによって滑らせている。

このとき、それぞれの橋桁端部に加速度計を取り付け、載荷中の橋桁の応答加速度の変化を、また橋脚Bおよび橋脚Cの中央部両面にひずみゲージを貼り付け、橋脚のひずみの変化を測定した(図-1)。計測データのサンプリング間隔は200 μ secとした。

2次元振動台により、この橋脚模型への入力周波数

を変化させ、振幅を2mmに固定したサイン波を橋軸水平方向に5秒間入力した。落橋防止連結板を取り付けて実験を行う場合には、図-2に示す形状・寸法の鋼材(SS400)で製作した落橋防止連結板の模型を、図-3に示すように橋桁側面両側に直径3mmのピンにより取り付けた。このとき、落橋防止連結板については、実構造に基づいて設計したわけではなく、桁同士をつなげて一体化するために取り付けたため、相似則については考慮していない。

(3) 橋桁の落下に関する実験

橋桁の落下実験に用いた橋脚模型は、共振周波数の測定に用いた模型と同様のものである。支持条件も同様であり、橋桁は橋脚上で片側固定支持、片側可動支持とした。

橋桁に落橋防止連結板を取り付けない場合と取り付けた場合について、2次元振動台により種々の振幅と周波数を持つサイン波を橋軸水平方向に5秒間入力し、桁の衝突が見られるかどうか、またそれによる落橋の有無を観察した。さらに、地震波を入力した場合についても同様に試験を行った。このとき入力した地震波は、兵庫県南部地震の際に神戸海洋気象台で計測された地震波を、最大加速度が同じになるようにし、最大振幅が1/100、時間軸を1/10に縮小した波形を用いた。地震波の加速度履歴およびそのフーリエスペクトルをそれぞれ図-4および図-5に示す。図-5から、入力した地震波の卓越周波数は約6Hz付近であることがわかる。いずれの載荷の場合も、それぞれの桁端部の応答加速度の変化および橋脚のひずみの変化を測定した。

落橋防止連結板を取り付けた場合については、両側の連結板表面にひずみゲージを貼り付け、載荷中連結板に伝達されるひずみの履歴を測定した。また、落橋防止連結板の2つの孔(ϕ 4.5mm)の内側に、緩衝材として厚さ0.5mmのゴムおよび鉛をピンの周りに巻いて挿入した場合についても同様に試験を行った。これらの落橋防止連結板および緩衝材の形状および寸法を図-6に示す。ゴムは天然ゴムを用いた。緩衝材として用いたゴムと鉛の力学的性質を表-1に示す^{15),16)}。

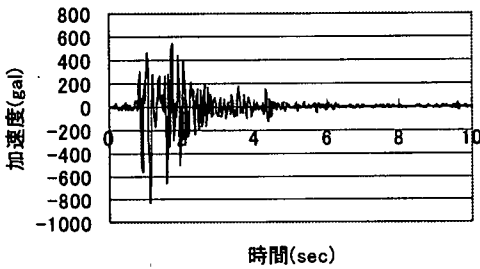


図-4 入力した地震波の波形

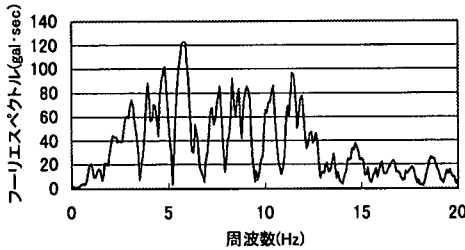


図-5 入力した地震波のフーリエスペクトル

3. 実験結果および考察

(1) 橋脚模型の共振周波数の測定結果

落橋防止連結板を取り付けた場合について、橋脚模型に、振幅を一定とし周波数を変化させたサイン波を入力した場合における周波数とそのときの橋脚Bにおけるひずみ履歴の最大値から共振曲線を求めた結果を図-7に示す。この図から、全体系の共振周波数は約6Hz付近であることがわかる。

また、落橋防止連結板を取り付けない場合について、橋脚Bおよび橋脚Cにおけるひずみ履歴の最大値から求めた共振曲線を図-8に示す。共振周波数は、橋脚Bでは約7.5Hz付近、橋脚Cでは約6.5Hz付近であることがわかる。

この橋脚模型について、道路橋示方書¹³⁾による固有周期の算定方法から、1基の下部構造とそれが支持している上部構造からなる設計振動単位における固有振動数を求めると表-2のようになる。

兵庫県南部地震の際の地震波における卓越周波数と実際の橋脚の固有振動数、および本実験で用いた地震波および橋梁模型の固有振動数を表-3に示す。したがって、今回の実験において、周波数の相似則は $f=1/10$ を満たす。

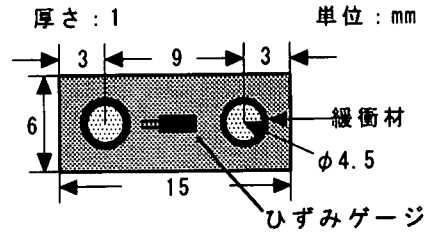


図-6 緩衝材を挿入した落橋防止連結板

表-1 緩衝材の力学的性質

	ゴム	鉛
密度(10^3kg/m^3)	0.91	11.37
ポアソン比	0.495	0.44
せん断弾性率(10^3MPa)	3.5×10^{-4}	7.4
ヤング率(10^3MPa)	10.5×10^{-4}	15.7

(2) 橋桁の落下に関する実験

a) 落橋防止連結板を取り付けない場合

橋脚模型に落橋防止連結板を取り付けない場合について、周波数や振幅を変化させてサイン波を入力したときの結果を表-4に示す。この表から入力したサイン波の等価加速度が最も大きい周波数10Hz、振幅2mmの場合では落橋せず、落橋の有無は加速度の大きさに必ずしも依存しないことがわかる。橋桁の落下は入力するサイン波の周波数と振幅に依存することがわかる。

落橋した場合(周波数5Hz、振幅3mm)と落橋しなかった場合(周波数10Hz、振幅2mm)における橋桁の応答加速度の履歴を図-9、10に示す。このとき計測データは、150Hzのローパスフィルターでフィルター処理をしてノイズを除去している^{17)~19)}。周波数5Hz、振幅3mmのサイン波で振動させた場合では、橋桁の衝突による落橋が観察された。図-9から、橋桁Aの応答加速度は時刻1.75秒付近で増大して最大値約9Gを示し、橋桁Bでは約-26Gを示した。このとき橋桁が衝突して衝撃現象が生じたことがわかる。この図からも、橋桁の衝突により、落橋が生ずることがわかる。また、図-9において橋桁Aと橋桁Bでは、衝突後の応答加速度の符号が異なることから、追突型の衝突であることもわかる。橋桁が落下したのは橋桁Bの可動支持側のみであった。一方、落橋しなかった周波数10Hz、振幅2mmのサイン波で振動させた場合では、橋桁の衝突は見られなかった。このときの橋桁の応答加速度の履歴を図-10に示す。応答加速度は振幅の小さいサイン波形状

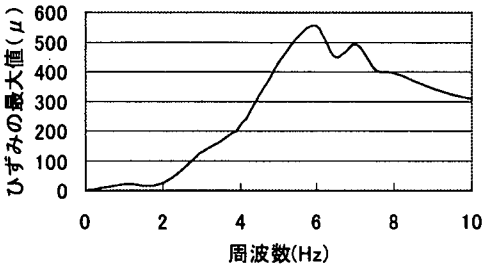
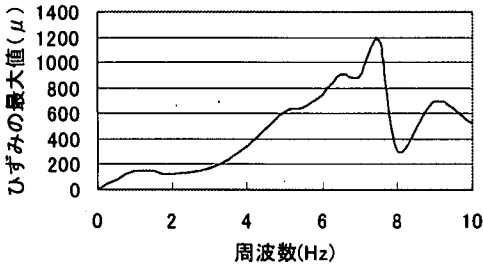
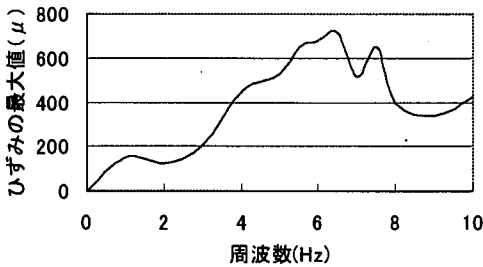


図-7 落橋防止連結板を取り付けた場合の共振曲線



(a)橋脚B



(b)橋脚C

図-8 落橋防止連結板を取り付けない場合の共振曲線

の応答であり、1~2Gの振幅を有しているが、これは振動している場合の応答加速度であり、橋桁の衝突によるものではないと考えられる。

サイン波を入力して落橋した場合では、2、3回の揺れで落橋していたが、地震波を入力した場合では落橋が見られなかった。実際の振動台の動きにおけるフーリエスペクトルを図-11に示す。実際に入力した波形では、卓越周波数が共振周波数の6Hz付近よりも小さくなっているために落橋しなかったものと考えられる。

落橋防止連結板を取り付けない場合の橋脚のひずみについて、周波数5Hz、振幅3mmで振動させた場合を図-12に、周波数10Hz、振幅2mmの場合を図-13に示す。図-12から時刻1.6秒付近で橋脚のひずみが増大し、1.9秒付近で落橋していることがわかる。また、図-13

表-2 計算で求めた固有振動数

	固有振動数(Hz)
橋桁Aと橋脚B	6.5
橋桁Bと橋脚C	3.2
橋桁A、Bと橋脚B、C	5.3

表-3 実構造物と模型における周波数の比較

実際の地震波の卓越周波数(Hz)	0.67~1.25
実際の橋脚の固有振動数(Hz)	0.63
模型に入力した地震波の卓越周波数(Hz)	6
橋梁模型の固有振動数(Hz)	3.2~6.5

表-4 入力したサイン波の周波数・振幅と落橋の有無

周波数(Hz)	振幅(mm)	等価入力加速度(gal)	落橋の有無
6	2	284	無
5	3	296	有
7	2	387	有
5	4	395	有
6	3	426	有
8	2	505	無
7	3	580	有
10	2	790	無

から、周波数10Hz、振幅2mmの場合には、周波数5Hz、振幅3mmの場合と比較して共振周波数から離れているために橋脚のひずみが大きくならないことがわかる。

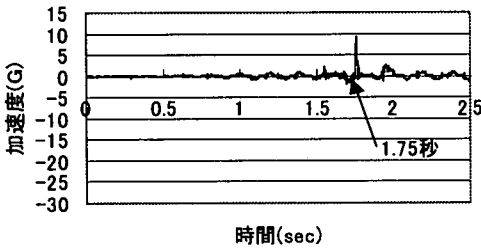
以上のことから、連結板がない場合、橋桁が衝突し、それによって落橋する可能性があることが確認できた。

b) 落橋防止連結板を取り付けた場合

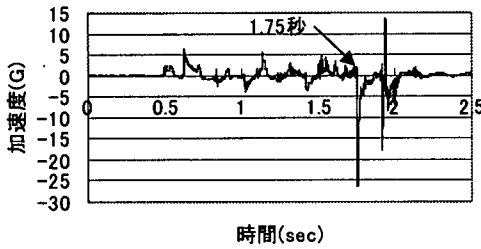
橋脚模型に落橋防止連結板を取り付け、サイン波および地震波を入力して振動させた場合では、何れの場合も落橋しなかった。落橋防止連結板に塑性変形が見られたものもあったが、破断したものは見られなかった。

落橋防止連結板を取り付けた場合における周波数5Hz、振幅3mmで振動させたときの橋桁の応答加速度の履歴を図-14に示す。図-14から、図-9の落橋防止連結板を取り付けない場合の応答加速度の時刻歴と比較して、応答加速度は低減されていることがわかる。

今回の実験では、落橋防止連結板を取り付けない場合において追突型の衝突が見られた。落橋防止連結板を取り付けた場合においても、衝撃的な外力が若干発生することが想定できるので、落橋防止連結板に何らかの緩衝効果を持たせることが必要であると考えら



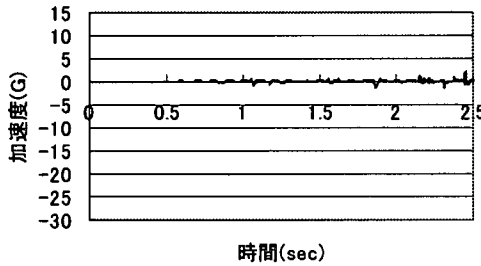
(a) 橋桁A



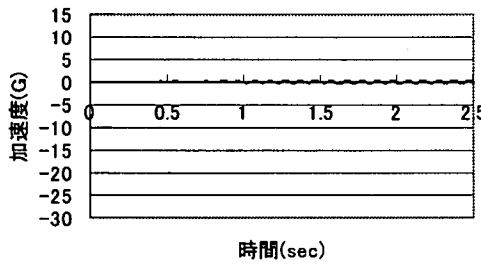
(b) 橋桁B

図-9 応答加速度の時刻歴

(周波数5Hz, 振幅3mm)



(a) 橋桁A



(b) 橋桁B

図-10 応答加速度の時刻歴

(周波数10Hz, 振幅2mm)

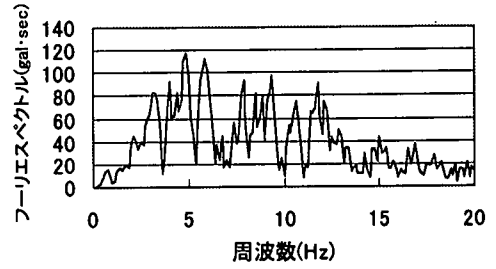
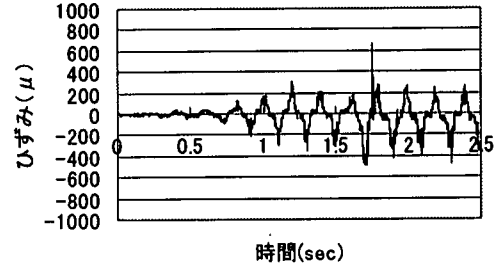
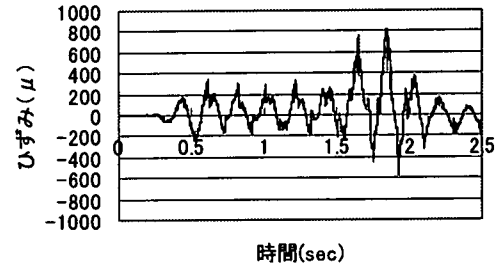


図-11 振動台のフーリエスペクトル



(a) 橋脚B



(b) 橋脚C

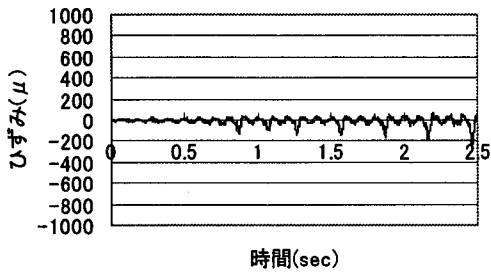
図-12 橋脚のひずみ時刻歴

(周波数5Hz, 振幅3mm)

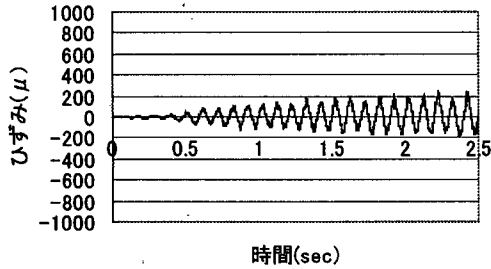
れる。また、今回の実験では落橋防止連結板が破断した例はなかった。連結板が衝撃的な荷重によって破断することによる橋桁の落下の可能性については今後の検討課題である。

(3) 落橋防止連結板における緩衝材の効果

落橋防止連結板のひずみ履歴を図-15, 16に示す。これらは周波数7Hz, 振幅3mmおよび周波数8Hz, 振幅2mmのサイン波を入力した際の、落橋防止連結板の緩衝材がない場合、緩衝材として機械的性質の異なるゴムおよび鉛を挿入した場合についてである。これらの図から、周波数7Hz, 振幅3mmの場合では、緩衝材の

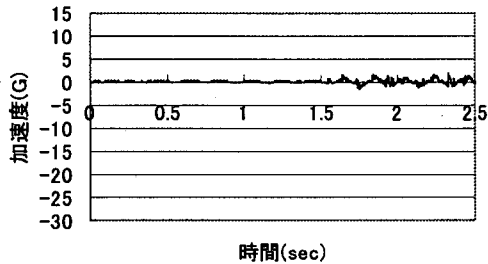


(a)橋脚B

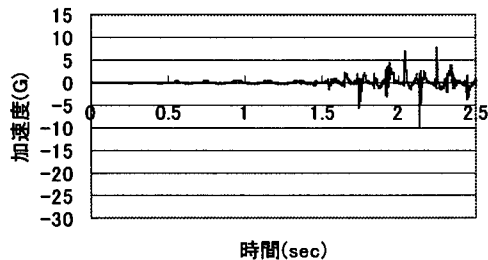


(b)橋脚C

図-13 橋脚のひずみ時刻歴
(周波数10Hz, 振幅2mm)

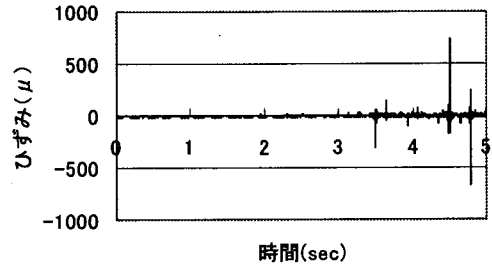


(a)橋桁A

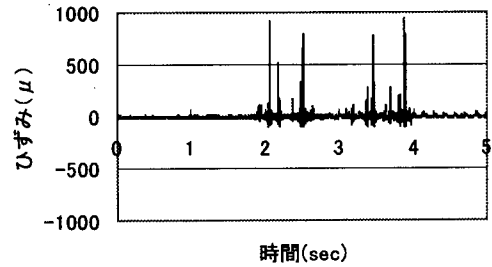


(b)橋桁B

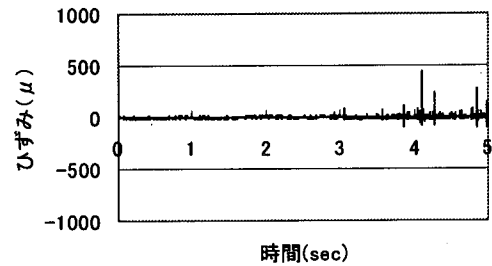
図-14 応答加速度の時刻歴 (周波数5Hz, 振幅3mm)
(落橋防止連結板を取り付けた場合)



(a)緩衝材がない場合



(b)緩衝材がゴムの場合

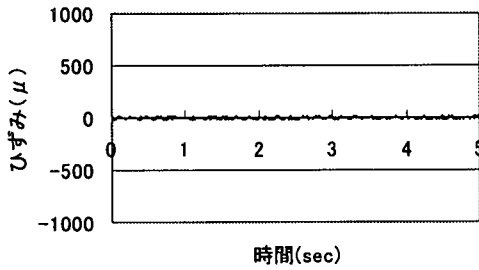


(c)緩衝材が鉛の場合

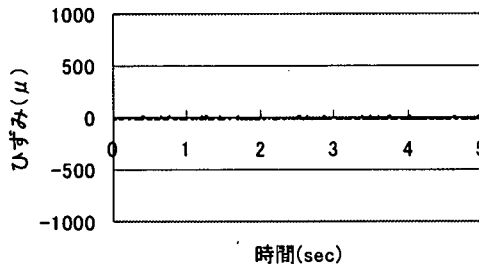
図-15 落橋防止連結板のひずみ時刻歴
(周波数7Hz, 振幅3mm)

有無および種類に関わらず、連結板のひずみ履歴がいずれもパルス状の波形となっている。これは、ピン径と孔径との間に差があり、その差はゴムを緩衝材として用いた場合が最大であることによる。また、周波数8Hz, 振幅2mmのサイン波を入力した場合では、連結板のひずみの大きさがいずれも同程度に小さくなり有意差が見られなかった。共振周波数からも外れており、このような波では緩衝材の有無に関わらず落橋防止連結板そのものの影響が小さいと考えられる。

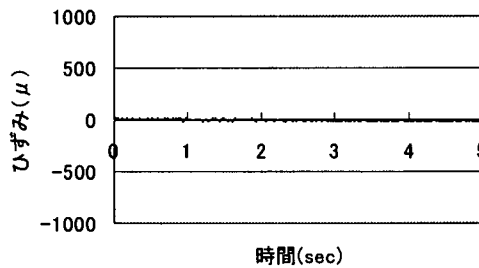
一方、地震波を入力した際の、緩衝材がない場合、緩衝材としてゴムを挿入した場合および鉛を挿入した場合における連結板のひずみの変化を図-17に示す。緩衝材を挿入しない場合、および緩衝材としてゴムを挿入した場合は、連結板のひずみにパルス状の応答



(a)緩衝材がない場合

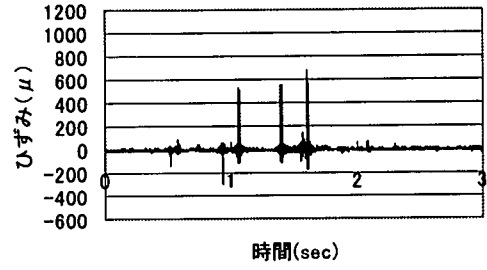


(b)緩衝材がゴムの場合

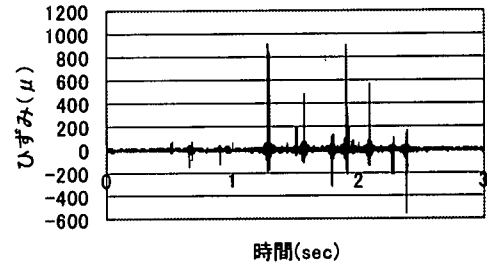


(c)緩衝材が鉛の場合

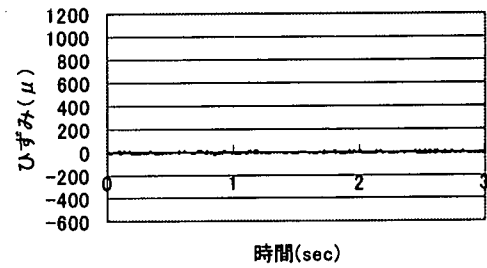
図-16 落橋防止連結板のひずみ時刻歴
(周波数8Hz, 振幅2mm)



(a)緩衝材がない場合



(b)緩衝材がゴムの場合



(c)緩衝材が鉛の場合

図-17 落橋防止連結板のひずみ履歴
(地震波入力の場合)

が見られた。また、緩衝材として鉛を挿入した場合には、パルス状の応答が見られず、他の場合に比べてひずみの値が小さくなっていることがわかる。

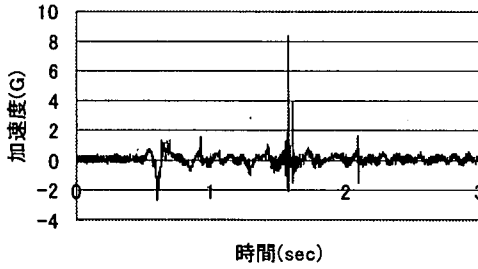
さらに、このときの橋桁の応答加速度の履歴を図-18に示す。これらの図から、緩衝材を挿入しない場合と比較して、緩衝材にゴムや鉛を挿入した場合には最大加速度が低減されており、衝撃的な外力を吸収する緩衝材の効果がみられることがわかる。

以上のことから、今回入力した地震波の場合では、緩衝材に鉛を挿入することにより、橋桁の応答加速度や橋脚のひずみ、落橋防止連結板の伝達ひずみが低減できることがわかった。表-1に示したように、鉛の剛性の大きさがその効果の一つと考えられる。剛性については、ゴムのような低剛性であると、図-15(b)や図

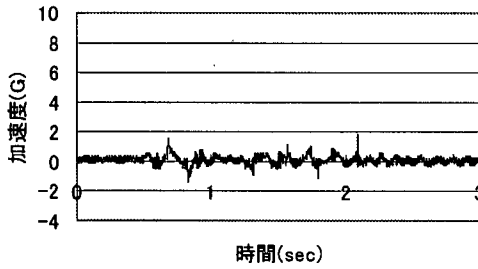
-17(b)に見られるように、ピンと連結板の孔との間に隙間があるのと同じ状態になり、パルス状の応答が卓越する。逆に、緩衝材がない場合には、剛性が大きいために図-15(a)や図-17(a)のようなパルス状の応答が見られる。したがって、緩衝材として望ましい剛性としては鉛のように鋼とゴムの間程度のものがよいと思われる。

また、各々の場合についての減衰性能に着目すると、減衰定数 ζ は応答振幅のピークの $1/\sqrt{2}$ をとる周波数 f_1 、 f_2 を用いて、

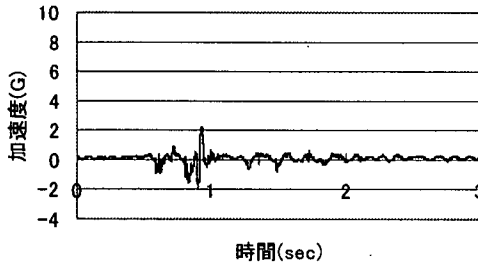
$$\zeta = \frac{f_2 - f_1}{f_1 + f_2} \quad (11)$$



(a)緩衝材がない場合



(b)緩衝材がゴムの場合



(c)緩衝材が鉛の場合

図-18 応答加速度の時刻歴

と表されることから²⁰⁾、図-19に示すような橋桁のフーリエスペクトルから求めた減衰定数は表-5のように求まる²¹⁾。この表より、緩衝材として鉛を用いた場合、減衰定数は0.11と他の場合に比べて大きくなっており、減衰効果が発揮されていることがわかる。緩衝材がゴムの場合では緩衝材のない場合よりも減衰定数は小さくなっているが、これはゴムのような材料では連結板とピンの間が空隙として挙動するために減衰効果が表れていないためと考えられる。

緩衝材として鉛そのものが適切というよりも、鉛のようにある程度の剛性を有し、減衰効果の高い材料を用いることが、衝撃的な外力を吸収する上で望ましいと考えられる。

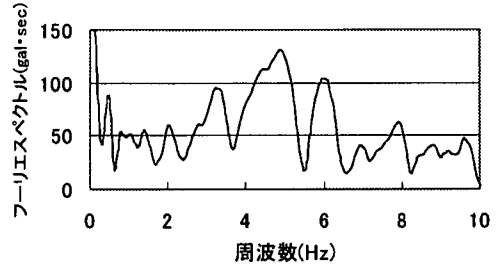


図-19 フーリエスペクトルの例
(緩衝材が鉛の場合)

表-5 緩衝材の違いによる減衰定数

	減衰定数
連結板なし	0.03
緩衝材なし	0.09
緩衝材：ゴム	0.06
緩衝材：鉛	0.11

4. 結論

本研究では、兵庫県南部地震で実際に被災した橋梁を縮小した2径間の橋梁模型を製作し、2次元振動台を用いて振動させたときの橋桁や橋脚の動的応答や落橋防止連結板の有効性および緩衝材の効果などについて検討を行った結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 橋桁が落下する条件の一つとして、橋桁同士が衝撃的に衝突し、橋桁の衝突によって落下することが確認できた。
- 2) 今回の実験においては、衝突によって落橋した場合に追突型の衝突が見られた。このような状態が想定される場合には、追突型の衝突にそなえて緩衝材を桁端に設置することを考える必要がある。
- 3) 衝撃的な外力を低減させる意味で使用した緩衝材は、地震波入力時においてもその有効性が確認できた。
- 4) 耐衝撃性の観点から、落橋防止連結板に挿入する緩衝材として適切な材料は、ある程度の剛性を有し、減衰性能の高いものがよいと考えられる。例えば、今回の実験で用いた鉛はその一つの例である。

橋桁落下の他の原因としては、落橋防止連結板が衝撃的な引張力によって破断することにより、瞬時に橋桁が落下する可能性も考えられるが、このような現象については本研究では考察の対象とはしなかった。

参考文献

- 1)伊津野和行, 中村公信: 鋼製橋脚と隣接RC橋脚との地震時相互作用に関する研究, 鋼製橋脚の非線形数値解析と耐震設計に関する論文集, pp.287-294, 1997.
- 2)庄司学, 川島一彦, Anat Ruangrassamee, 運上茂樹, 足立幸郎, 長屋和宏: 桁間衝突の影響に対するゴム製緩衝装置の有効性に関する実験的検討, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.45A, pp.891-902, 1999.
- 3)庄司学, 川島一彦, Anat Ruangrassamee, 運上茂樹, 足立幸郎, 長屋和宏: 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, 第2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.427-432, 1998.
- 4)小畑誠, 大見敬一, 後藤芳顕: 高エネルギー吸収型耐震連結板の挙動に関する実験的研究, 鋼構造年次論文報告集第4巻, pp.385-390, 1996.
- 5)小畑誠, 栗原位充, 後藤芳顕: 高エネルギー吸収型耐震連結板の強度および変形特性, 土木学会論文集No.612/I-46, pp.239-249, 1999.
- 6)田嶋仁志, 半野久光, 久保田強, 金井良助, 中村敏夫: 落橋防止連結板の衝撃破壊実験と強度特性, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1815-1826, 1998.
- 7)園田佳巨, 衛藤芳昭, 石川信隆, 生駒信康, 彦坂照: ゴム緩衝ピンを用いた落橋防止連結板の静的および動的応答特性に関する実験的考察, 土木学会論文集No.598/I-44, pp.333-346, 1998.
- 8)園田佳巨, 彦坂照, 穴水宏和, 生駒信康, 石川信隆: ゴム緩衝ピンを用いた落橋防止連結板の静的弾性および衝撃弾性応答特性に関する研究, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.1645-1654, 1999.
- 9)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.
- 10)Moriyama, T. and Yoda, Y.: Effects of Bridge Restrainer System with Shock Absorber on Impact Force Absorbing Capability, Proceedings of the 2nd Asia-Pacific Conference on Shock & Impact Loads on Structures, pp.377-382, 1997.
- 11)森山卓郎, 依田照彦: 落橋防止連結板の衝撃力緩和におよぼす緩衝材の効果, 第4回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, pp.39-44, 1998.
- 12)江守一郎, D.J.シューリング: 模型実験の理論と応用, 技報堂出版, 1973.
- 13)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 1996.
- 14)兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査報告書: 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会, 1995.
- 15)日本規格協会: 非金属材料データブック, 日本規格協会, 1985.
- 16)日本機械学会: 機械実用便覧, 日本機械学会, 1990.
- 17)南茂夫: 科学計測のための波形データ処理, CQ出版社, 1986.
- 18)酒巻勝, 喜多龍一郎, 小暮幹太, 藤掛一典, 大野友則: 衝撃実験計測データのフィルター処理方法に関する考察, 第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, pp.151-155, 1996.
- 19)大崎順彦: 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1994.
- 20)Ray W. Clough / Joseph Penzien: 構造物の動的解析, 科学技術出版社, 1978.
- 21)松井義孝, 背地知也, 大島俊之, 林川俊郎, 当麻庄司: 連続ラーメン橋の橋脚の材料非線形性と減衰定数について, 橋梁振動コロキウム'97論文集, pp.101-108, 1997.

(1999. 8. 20受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF POUNDING BETWEEN THE ADJACENT GIRDERS ON THE FALLING GIRDERS

Takuro MORIYAMA and Teruhiko YODA

After Hyogoken-Nanbu Earthquake in 1995, pounding between the adjacent girders is of major concern from the view point of base isolation. In this paper, an experimental study using the two-dimensional shaking table was performed focusing on the dynamic and impact behavior of the pounding between the adjacent girders. The girder falling was observed due to the pounding between the adjacent girders. The effects of the pounding on the falling girders were examined by the response acceleration of the girders and deformation of the piers. The effects of the shock absorber such as rubber and lead inserted to the bridge restrainer plates in order to decrease impact force were investigated.