

衝突を考慮した高架橋モデルの振動台実験とそのシミュレーション

梶田幸秀*, 渡邊英一**, 宇都宮智昭***, 永田和寿****, 津村洋祐*****

*修士(工学) 防衛大学校助手 土木工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

** Ph.D.・工博 京都大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

***工博 京都大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

****修士(工学) 京都大学大学院助手 工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

*****京都大学大学院工学研究科土木工学専攻修士課程 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

1995年兵庫県南部地震以降、高架橋の耐震設計においては、地震後のライフラインとしての機能確保が大きな仮題となっている。そのため、高架橋を基礎、桁、支承等からなるシステムとしてとらえ、その耐震性を検討した研究が数多く行われている。本研究では、3連の単径間高架橋の縮小模型の橋軸方向に正弦波ならびにスケールした実地震波を入力することにより、隣接する高架橋の上部構造の衝突を考慮し、その高架橋群の応答性状について検討した。固定・可動支承を組み入れるなどし、高架橋の各構造要素を忠実に再現した模型を用いての加振実験を行った。また、得られた実験結果をもとに、高架橋を全体システムとしてとらえた時刻歴応答解析手法の妥当性についてさらに検討した。

Key Words : shaking table test, elevated bridge, fixed/movable support, pounding of girders

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震以降、高架橋の耐震設計を行う場合には、橋脚の耐震設計のみにとどまらず、高架橋をシステムとしてとらえ、その耐震性を評価し、落橋を防ぐことを大前提としており、地震後のライフラインとしての機能を確保することが義務づけられている。そのため、高架橋をシステムとしてとらえるため、橋脚、基礎、支承、上部構造ならびに落橋防止構造といった各構造要素の相関や桁間衝突などを考慮した解析が多数行われるようになった¹⁾²⁾。しかしながら、高架橋の全体システムの解析を行うには、各構造要素の特徴を表現しうる解析モデルを作成する必要があり、支承、衝突等においては、まだまだ不明瞭な点が多く、解析モデルの妥当性を評価するために実際の被災例をシミュレートするなど、逆解析手法がとられている³⁾。

このような現状をふまえ、高架橋全体システム、もしくは各々の要素の挙動に関する実験的な研究が行われるようになってきている。例えば、高架橋を構成する構造要素である支承に着目した研究では、森重ら⁴⁾がBP-P支承の水平荷重下での挙動を、宇佐美ら⁵⁾がピン支承の水平荷重下での挙動を実験・解析の両面から明らかにしている。また、高架橋全体システムを対象とした実験として、庄司ら⁶⁾は2連の単径間高架橋モデルを用い、スケールした実地震波を入力することにより桁間衝突や桁間連結装置に加えてゴム製緩衝装置の有効性を検討している。また、森山ら⁷⁾も2連の単径間高架橋モデルを用いて橋軸方向に正弦波を入力することにより、落橋は、橋梁の共振現象と桁間衝突が影響していることを実証している。

これらの研究成果をふまえ、桁間距離の隣接する高架橋の応答に及ぼす影響を検討することを本研究の目的とする。したがって、実験供試体として3連の単径間高架橋モデルを作成することにした。高架橋モデルの作製にあたっては、過去の研究⁸⁾で用いた解析手法の妥当性を評価する意味でも、実際の高架橋の構造要素を忠実に再現する必要があると考え、固定・可動支承を考慮できる固定可能なスライドベアリングを使用している。この高架橋モデルの橋軸方向に正弦波やスケールした実地震波を入力し、衝突現象をとまらぬ応答性状を明らかにするとともに、得られた実験結果をもとに高架橋を全体システムとしてとらえた解析手法の妥当性についても別途検討を行った。

2. 振動台実験の概要

2.1 振動台実験

本実験で対象とした模型は、図-1、写真-1に示すような3連の単径間高架橋を想定したものである。また、本実験で高架橋をモデル化する際に考慮したのは、模型の固有周期が一般の桁橋の固有周期(0.3~1.2秒程度)におさまるように橋脚材の剛性、上部質点の質量を調整したもので、実在する高架橋に対して質量長さ等の相似則が成り立つようにモデル化を行っているわけではない。また、本実験では桁同士の影響に着目しているため、桁や橋脚等は鋼製(SS400材を用いた)で弾性応答するのみと考えた。なお、本実験に使用する振動台は、京都大学内に設置された大地震動載荷システムの高精度振動台で、駆動方式は電気油圧サーボ式、振動台寸法は1.5m×1.5m、最大搭載重量2tonf、最大加振力3ton-g、最大振幅は±100mmの性能を有するもので

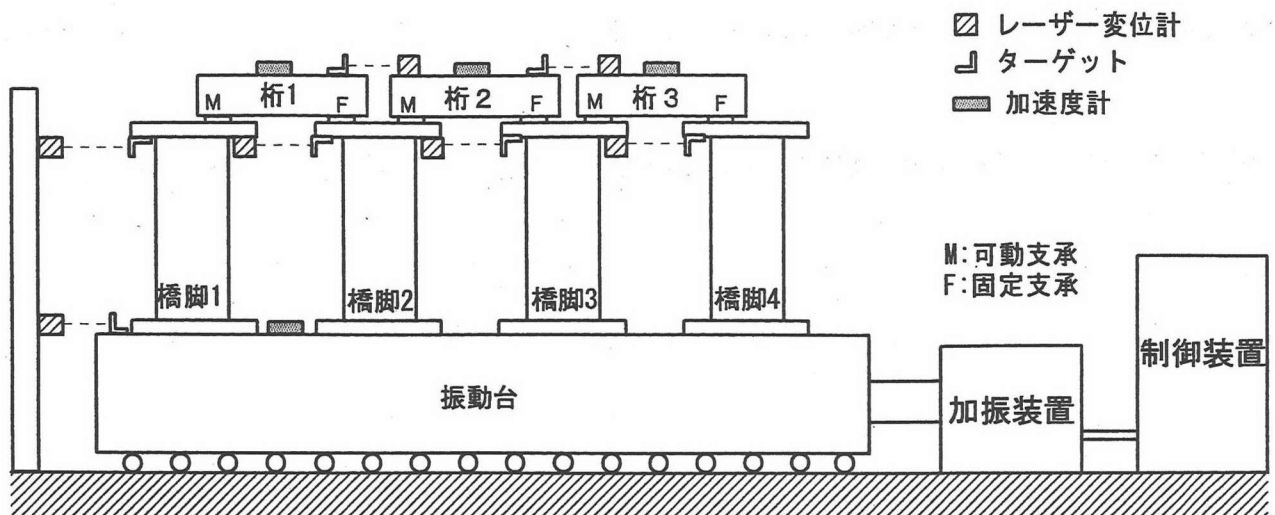


図-1 実験供試体概要図

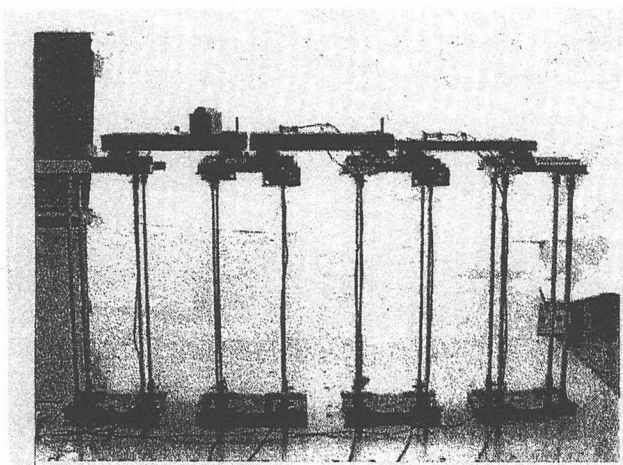


写真-1 実験供試体

ある。

図-2 に橋脚および脚上の支承構造の詳細図を示す。縦横の長さが 1500mm の正方形形状をした振動台に橋脚支持基盤(厚さ 20mm, 幅 140mm, 長さ 240mm)をボルトで剛結した。その上に厚さ 4.5mm, 幅 30mm, 高さ 600mm の板材を 4 本 1 セットとし橋脚をモデル化した。橋脚支持基盤と板材はそれぞれ垂直になるようにアングル材で両側からはさみこみ固定した。一方、橋脚上に橋脚天端部(厚さ 20mm, 幅 160mm, 長さ 240mm)を設け、橋脚基盤の取り付けと同様に板材と垂直になるようにアングル材で固定した。また、橋脚天端部上面にガイドレール(長さ 220mm)を橋軸方向に 2 本設置し、橋軸方向への移動を可能にした。これら橋脚支持基盤、橋脚部材、橋脚天端部、ガイドレールから構成されるユニットをもって 1 本の橋脚のモデルと考え、振動台の加振方向に橋脚を 4 つ設置し、単径間が 3 つ並ぶ高架橋構造を取り上げた。橋脚は便宜上、加振装置から遠いものを橋脚 1、橋脚 2、橋脚 3、橋脚 4 と呼ぶことにする。さらに、ガイドレールに桁と一体となったガイドをはめ込み、上部構造とした。桁は、橋脚 1-橋脚 2、橋脚 2-橋脚 3、橋脚 3-橋脚 4 間に設

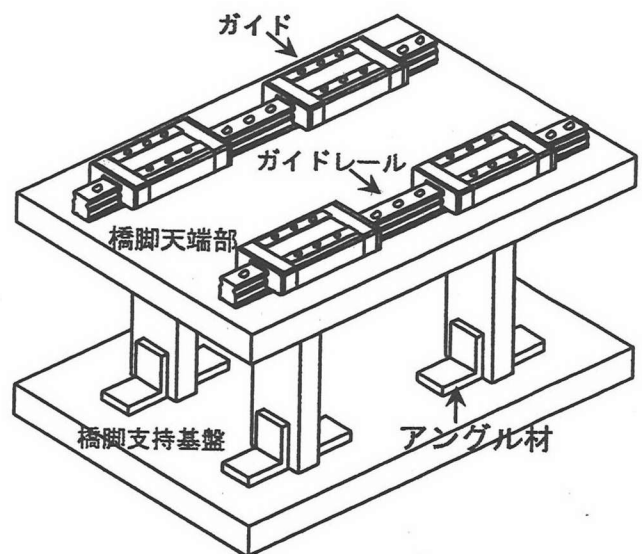


図-2 橋脚詳細図

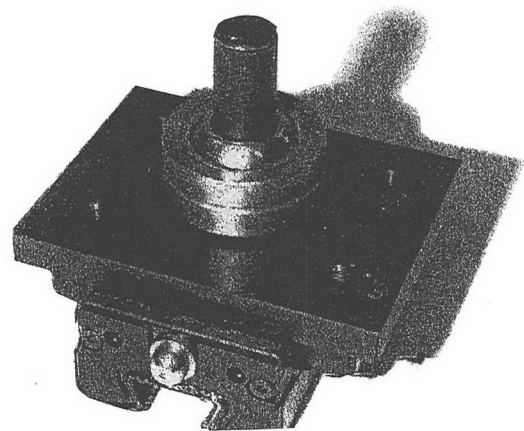


写真-2 ガイドと球面軸受

置することになる。支承は図1に示すように、可動支承、固定支承が交互にくるように配置するが、固定支承については、ガイドを両端からストッパーで固定し、橋軸方向の移動を制限することによりモデル化した。これにより、桁は、固定支承を有する橋脚と一体となって動くことになる。可動支承については、レールとガイドの間に摩擦力が存在するものの、上部構造の慣性力に対して小さいので、橋軸方向には自由に動けるものと考えられる。また、桁は、橋脚間をまたがってガイドに固定されるわけだが、各橋脚の水平移動にともなう上下動が引き起こす回転運動を制限しないよう、ガイドと桁の間に球面軸受を設置した。写真2にガイドと球面軸受けを示す。なお、本実験では、桁同士の衝突を発生させるため、各橋脚の固有周期を変える必要があり、桁の重量を変えることにより対応した。本実験では以下の桁を使用した(桁A:厚さ40mm,幅160mm,長さ345mm,重量164.4N,桁B:厚さ26mm,幅160mm,長さ345mm,重量106.8N)。なお、桁は、加振装置に遠い方から桁1,桁2,桁3と呼ぶこととする。

これらの供試体の応答を計測を行うために、図1中に示す位置に各種計測機器を設置した。加速度計は振動台、および桁1,桁2,桁3の加速度を測定するために設置し、橋脚1,橋脚2,橋脚3,橋脚4および桁1-2,桁2-3間の相対変位をレーザー変位計で測定した。データ収録には、衝突による加速度や変位を計測できるようにサンプリング時間を0.001秒として、オンライン計測を行った。

2.2 自由振動実験によるモデルの同定

橋脚が単独に振動する際の固有周期と減衰定数を求めるために、自由振動実験を行った。まず、桁および可動支承をはずした状態で、橋脚1～橋脚4について振動実験を行った。ここでは、橋脚それぞれに初期変位を与え、その自由振動中の変位振幅およびピーク値の時間間隔より固有周期と減衰定数を算出した。その結果を表-1に示す。なお、減衰定数は、次式を用いて求めた⁹⁾。

$$h = \frac{1}{2\pi} \log_e \frac{Y_n}{Y_{n+1}} \quad (1)$$

Y_n n サイクル目のピーク変位振幅

また、実験で使用した橋脚モデルの重量と剛性を表2に示す。

次に、桁Aを載せたときの高架橋の自由振動実験を行った。この振動系では、設置精度に左右して可動支承の摩擦力が働き、また、制作精度とも関連して各橋脚ユニットの減衰は一定ではない。そこで、摩擦力をパラメータとした自由振動の解析をパラメトリックに行い、自由振動実験を再現できる場合の値を可動支承の摩擦力とした。橋脚2の自由振動実験と解析の結果を図3に、固有周期と、可動支承二つ分の摩擦力の値を表3に示す。ここで、摩擦係数はそれぞれ、0.078, 0.120, 0.078であるが、道路橋示方書⁹⁾では転がり摩擦の摩擦係数を0.05としており、本実験ではそれより大きな値となった。

次に、桁を載せ、3Hz～5Hzの加振周波数帯で、0.1Hzきざみで正弦波で加振する共振実験を実施した。周波数を0.1Hzきざみ

表-1 固有周期と減衰

	固有周期(秒)	減衰定数(%)
橋脚1	0.157	0.56
橋脚2	0.168	0.36
橋脚3	0.165	0.32
橋脚4	0.161	0.58

*固有周期の理論値:0.18秒

表-2 橋脚の諸元

	重量(N)	剛性(N/cm)
橋脚1	85.3	137.3
橋脚2	90.2	127.3
橋脚3	95.1	125.9
橋脚4	91.1	138.1

表-3 固有周期と転がり摩擦

	固有周期(秒)	転がり摩擦(N)
橋脚2	0.294	6.42
橋脚3	0.290	9.90
橋脚4	0.280	6.42

表-4 共振周波数

	共振周波数(Hz)	固有周期(秒)
橋脚2	3.45	0.290
橋脚3	3.65	0.274
橋脚4	3.55	0.282

*固有振動数の理論値:3.33Hz

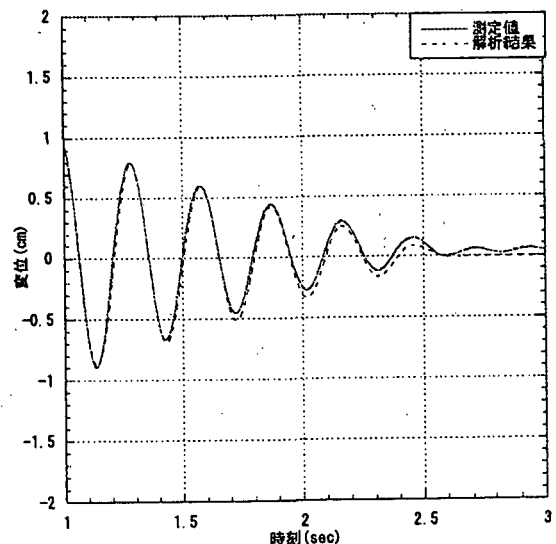


図-3 橋脚2の自由振動結果

で変化させたときの桁応答加速度が最大になる周波数を表4に示す。表3に示す自由振動結果から、算定した固有周期とは整合性があると思われる。

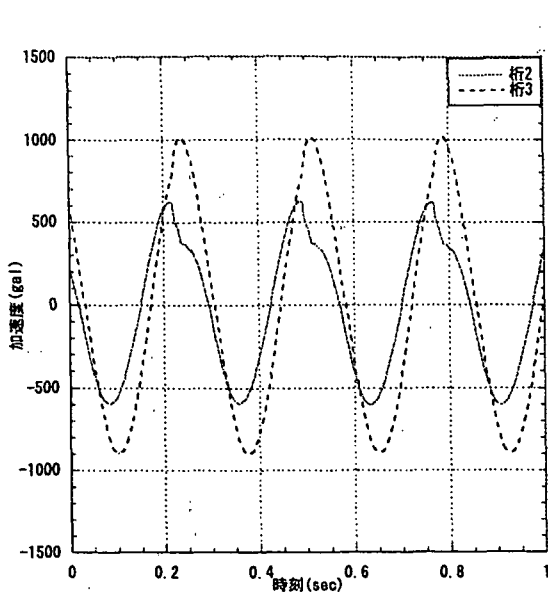


図-4 桁2, 桁3の加速度応答

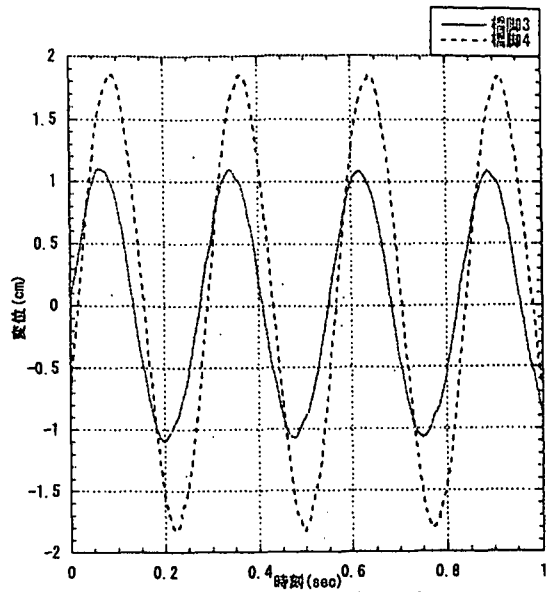


図-5 橋脚3, 橋脚4の変位応答

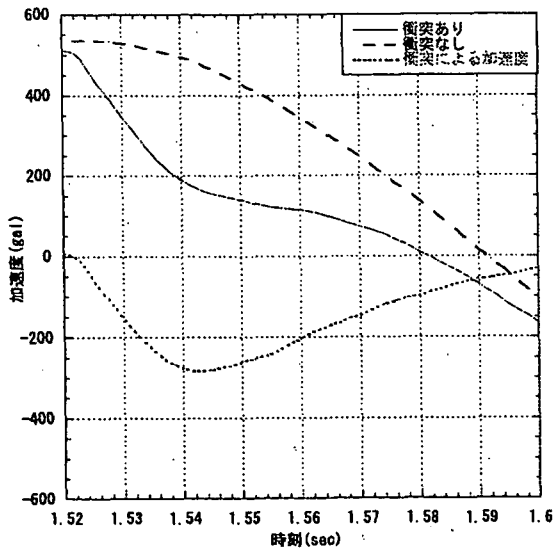


図-6 衝突時の加速度

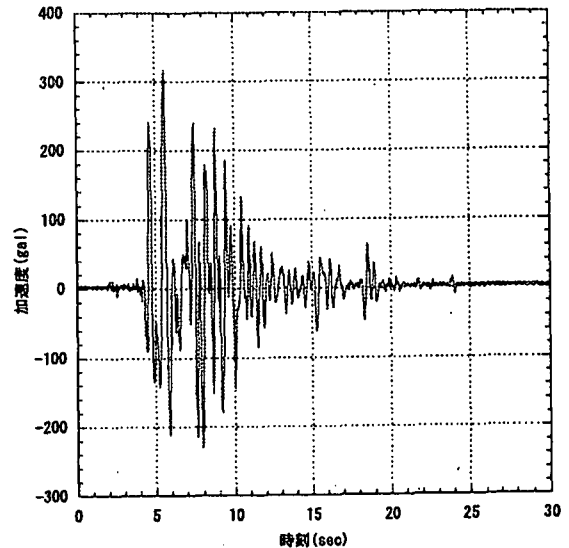


図-7 入力地震波

表-5 桁の平均衝突加速度(サンプル数14)

	case1		case2	
	桁A	桁B	桁A	桁B
加速度(gal)	145	211	177	272
衝突力(N)	37.9	42.6	47.0	53.0
標準偏差	0.010	0.007	0.009	0.006

3. 実験結果および考察

3.1 振動実験結果

桁2を桁B, 桁3を桁Aとした場合(Case1), 桁2に桁A, 桁3に桁Bを載せた場合(Case2)に, 最大加速度が60gal程度, 周波数が3.6Hzの正弦波を入力し, 桁同士の衝突を発生させた。なお, Case1, Case2では, 桁2と桁3の衝突を見るため, 桁1を取りはずして実験を行った。Case1の桁遊間は0.25cm, Case2の桁遊間は0.61mmと設定した。また, Case1におけるの桁2と桁3の加速度を図4に, 橋脚3, 橋脚4の変位応答を図5示す。桁2で

は衝突が発生すると, 局所的に加速度応答の変化がみられる。Case2において桁2の衝突時の加速度応答を拡大し, 衝突しない時のそれと比較したもの, および衝突しないときと衝突するときの加速度の差をとったものを図6に示す。図6より, 衝突により発生する加速度波形の乱れは, ピークに達するまでは, 正弦波形のような状態になっているのがわかる。また, このときのピーク値が衝突によって発生する衝突加速度であり, これに質量をかけたものが衝突力の最大値である。衝突が定常的に発生するし状態で衝突加速度の4秒間平均値を表-5に示す。

次に, 図7に示す, 最大加速度を40%程度にスケールダウンしたkobe_ns地震波を3連の単径間高架橋モデルに対して入力し実験を行った。まず, 桁1, 2, 3に通常の桁を載せたとき(Case3)の実験を行った。そのときの桁1, 桁2の変位応答を図8, 図9に, 桁1-2間の相対変位応答を図10に示す。なお, この時の桁1-2間の桁遊間は0.5cmである。図8, 図9より, いずれの桁も

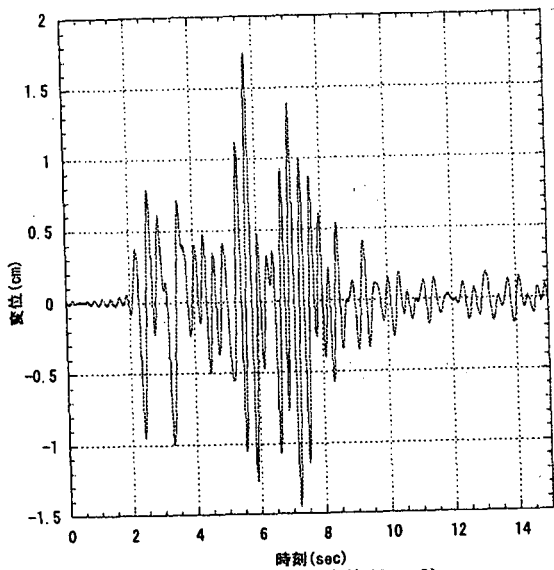


図-8 桁1の変位応答 (Case3)

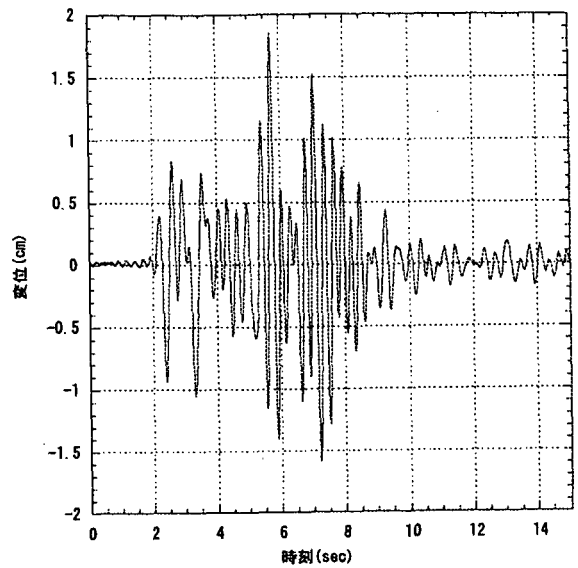


図-9 桁2の変位応答 (Case3)

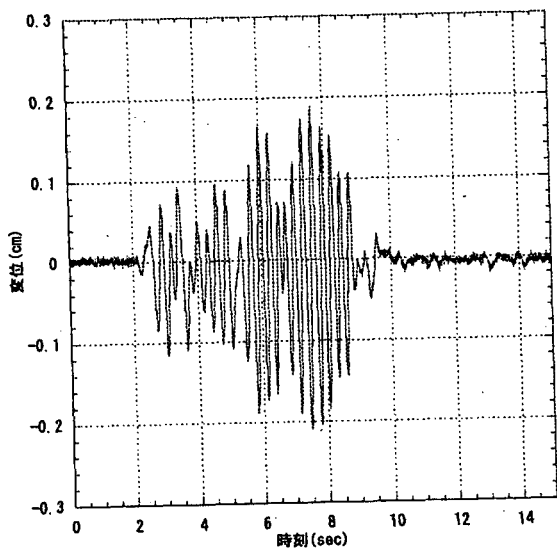


図-10 桁1-2間の相対変位 (Case3)

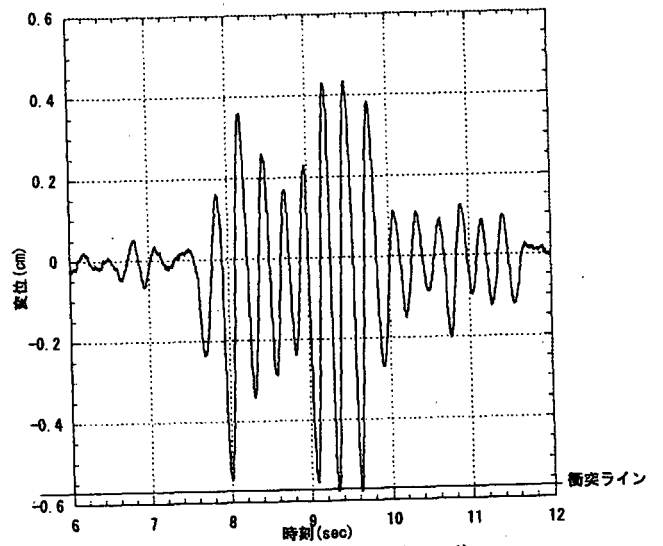


図-11 桁1-2間の相対変位 (Case4)

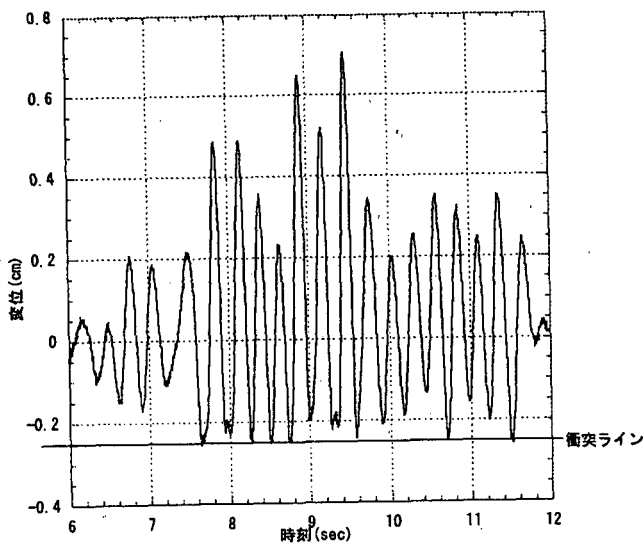


図-12 桁2-3間の相対変位 (Case4)

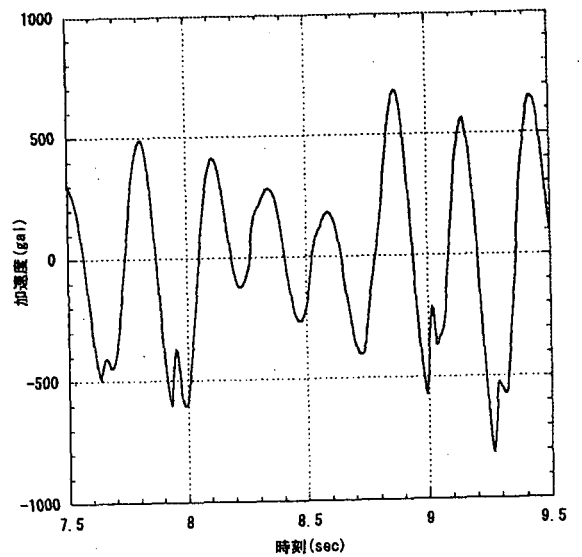


図-13 桁3の加速度 (Case4)

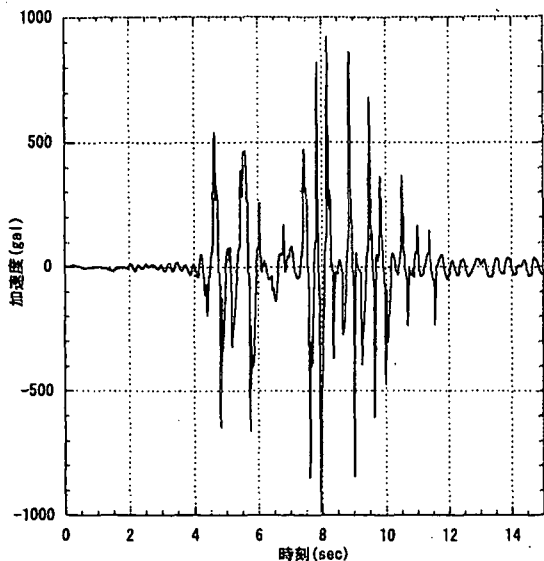


図-14 桁2の加速度応答 (Case5)

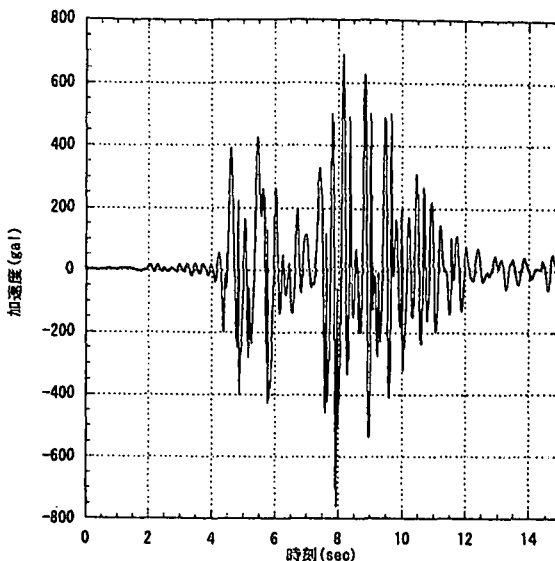


図-15 桁3の加速度応答 (Case5)

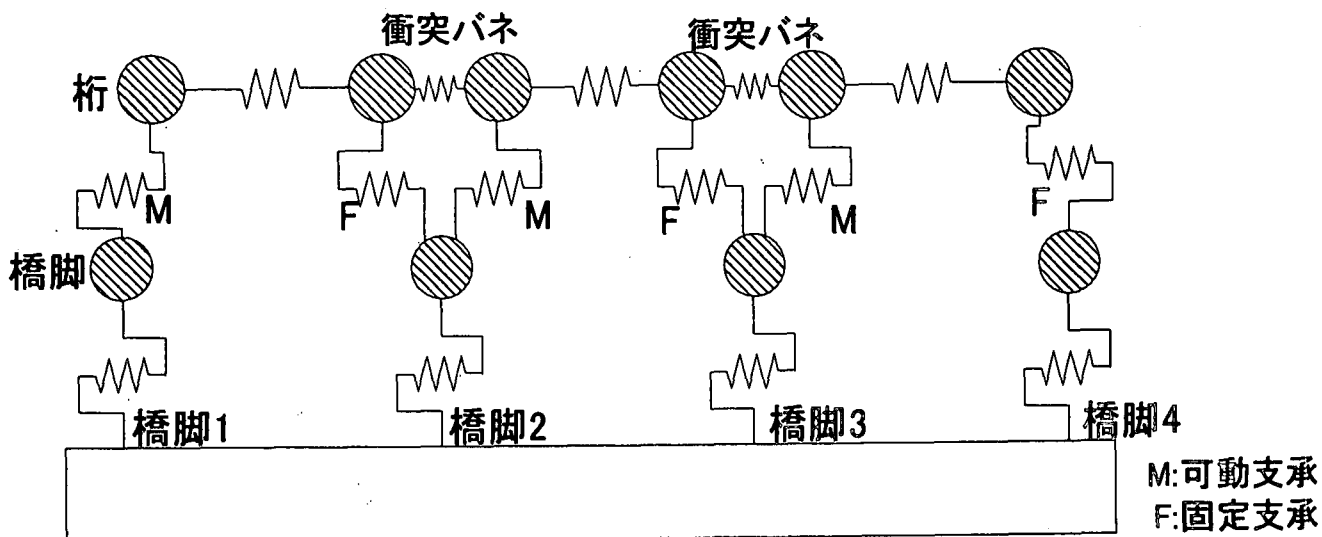


図-16 解析モデル

変位は 1.0cm を越えているが、橋脚の固有周期が近いので、ほぼ同じ位相で挙動し、桁間の相対変位がほとんど発生せず、衝突現象が起こっていないことがわかる。

次に、桁1、桁2を桁Aとし、桁3を桁Bとして実験を行った (Case4)。なお、この時の桁1-2、桁2-3間の遊間は、それぞれ 0.57cm、0.25cm とした。桁1-2、桁2-3間の相対変位応答を図-11、図-12に、桁3の加速度応答を図-13に表す。桁2と桁3の重量が異なるため、橋脚3と橋脚4が異なる固有周期で振動し、桁2-3間で桁の衝突が起こっている。そして図-11より、桁3と桁2がぶつかった影響により桁2の動きが変動し、その結果、同じ固有周期を有する隣接橋脚の間で、すなわち桁1-2でも衝突が発生していることがわかる。

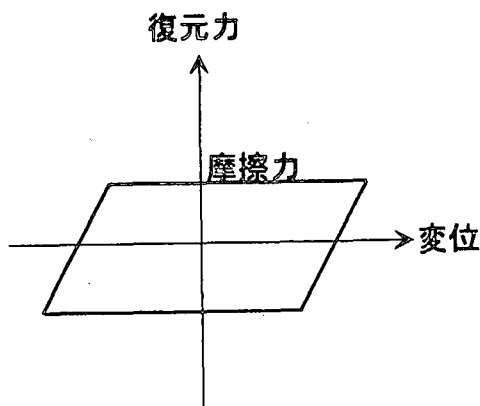


図-17 可動支承の復元力モデル

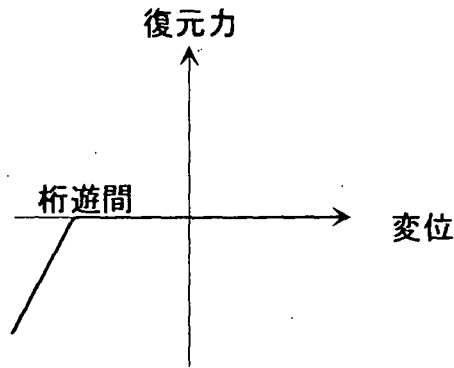


図-18 衝突バネの復元力モデル

表-6 橋脚の最大応答変位(cm)

	橋脚2	橋脚3	橋脚4
case3	1.75(2.01)	1.85(1.92)	1.85(1.79)
case4	1.73(1.97)	1.81(1.63)	1.60(1.42)
case5	1.76(2.00)	0.55(0.53)	1.54(1.45)

()内は解析結果を表す

さらに、桁1、桁2を桁Aとし、桁3を桁Bとし、桁2の固定支承を可動支承に変更し加振実験を行った(Case5)。ここでは、桁2の固定支承が破壊するかどうかを確定することを目的としている。この時の桁2、桁3の加速度応答を図-14、図-15に示す。図-13と図-15を比較してみると、桁2の固定支承が可動支承になったことにより、桁に発生する衝突加速度が増大していることがわかる。これは、固定支承が可動支承になったことにより桁の応答速度が増大したためである。

3.2 応答解析手法の妥当性に関する考察

応答解析には、図-16に示すようなバネ質点系モデルを用いた。橋脚、固定支承、桁の復元力は弾性とし、可動支承は摩擦力を降伏とした完全弾塑性型履歴モデル、桁間は衝突バネを考慮した。可動支承の復元力モデルを図-17に衝突バネの復元力モデルを図-18に示す。なお、衝突バネの剛性には、基本的には桁の剛性を適応した。

まず、衝突が起きない条件で、振動数をパラメータにとり、変位応答倍率を調べ、実験結果と比較した。その結果を図-19に示す。なお、解析で用いた減衰定数は、橋脚に対しては実験により得られた値を、固定支承、可動支承、桁についてはそれぞれ5%、0%、3%の値を用いた。比較結果より、高架橋モデルの応答倍率は解析値の方が実験値よりも上回っており、橋脚の減衰定数の設定が小さいことがわかった。しかしながら、全体の傾向はとらえていると考えられる。

次に、実験のCase3~5を、解析により再現した。各橋脚の最大変位応答の比較結果を表6にまとめて示す。この表より、解析値と実験値がある程度一致しているのがわかる。Case5の橋脚3には桁の慣性力がかからないため、変位が小さくなっている。

次に、衝突バネの剛性が変位に及ぼす影響について考えた。Case5において、衝突バネの剛性をパラメータにとり、解析を行

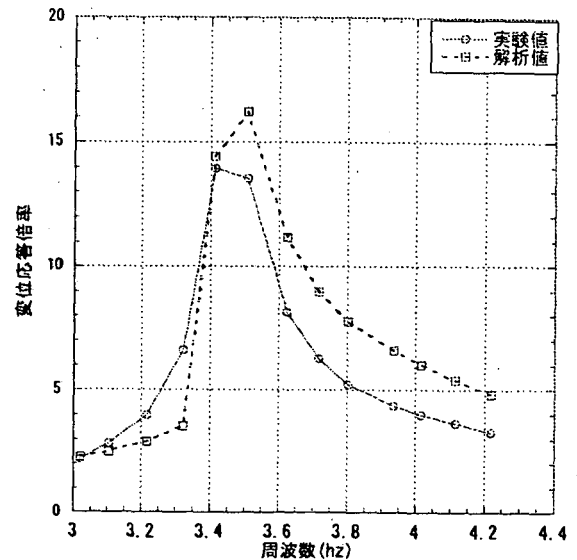


図-19 橋脚2変位応答倍率図

表-7 橋脚の衝突に対する影響 (cm)

衝突バネ剛性	橋脚2	橋脚3	橋脚4
桁剛性の10倍	2.53	0.56	1.84
桁剛性の1倍	2.00	0.53	1.45
桁剛性の0.1倍	1.99	0.55	1.69
衝突バネなし	1.40	0.45	0.77

った。その結果を表7に示す。これにより、桁の衝突が発生することによって、橋脚の変位が増大することがわかるが、剛性が大きいとその変化も大きくなる。本実験では、衝突バネの剛性は桁の剛性の1倍が妥当であると考えられる。

4. 結論

本研究では、3連の単径間高架橋模型の橋軸方向に正弦波ならびにスケールダウンした実地震波を入力、およびその解析を行うことにより、隣接する高架橋の上部構造の衝突を考慮した高架橋群の応答性状について検討を行い、以下のことが明らかになった。

- 固有周期が同じ橋脚が連続しているときは、桁同士の衝突は起きにくい。
- 固有周期が同じ橋脚が隣り合っている場合でも、固有周期が異なる他の脚からの衝突の影響を受けることにより、衝突が発生する可能性がある。
- 応答解析では、衝突現象を考慮することで橋脚の最大変位が大きく変化するため、衝突モデルに改良の必要があると考えられる。

謝辞

振動台による加振にあたり、京都大学大学院工学研究科土木システム工学専攻の家村和浩教授、五十嵐晃助教授、中西伸二技官に大変お世話になりました。ここに厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1)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, 1999.1.
- 2)西川大介, 目黒公郎: 兵庫県南部地震による阪神高速3号線高架橋崩壊被害のメカニズム解析, 第24回地震工学研究発表会講演論文集 Vol.2, pp.1017-1020, 1997.7.
- 3)梶田幸秀, 渡邊英一, 杉浦邦征, 丸山忠明, 永田和寿: 鋼製支承の破損を考慮した連続高架橋の地震時応答性状と落橋防止装置の有効性の検討, 構造工学論文集, Vol.45A, 土木学会, pp.903-914, 1999.3.
- 4)森重行雄, 鶴野禎史, 藤野陽三, 阿部雅人, 宇佐美哲, 柳野和也: BP-B 支承の水平荷重下での挙動, 土木学会第 54 回年次学術講演会, I-B220, pp.438-439, 1999.9.
- 5)宇佐美哲, 藤野陽三, 阿部雅人, 森重行雄, 鶴野禎史: ピン支承の水平荷重下での挙動, 土木学会第 54 回年次学術講演会, I-B221, pp.440-441, 1999.9.
- 6)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, Vol.45A, 土木学会, pp.891-902, 1999.3.
- 7)森山卓郎, 依田照彦, 平栗一哉: 桁間衝突が落橋におよぼす影響に関する実験的研究, 土木学会第 54 回年次学術講演会, I-B303, pp.602-603, 1999.9.
- 8)平井一男, 水田洋司: 耐震工学入門, 森北出版株式会社, 1994.3.
- 9) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書一同解説 I 共通編, p92, 1996.12.

(1999年11月19日受付)

A shaking table test on the elevated bridges considering the pounding of girders and its numerical simulation

Yukihide KAJITA, Eiichi WATANABE, Tomoaki UTSUNOMIYA, Kazutoshi NAGATA
and Yousuke TSUMURA

The 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake, has emerged that the necessity of functionable highway system over after main shock as a lifeline. Therefore, many research works have been carried out in order to evaluate the response of elevated bridges under severe earthquakes. Carried out herein is, a shaking table test on scaled elevated bridge model, consisting of three single span elevated bridges. The bridge model was shake in the direction of the bridge axis and the effect of pounding between the adjacent girders on the global response is assessed. In addition, the validity of the response analysis available currently is assessed by comparing to the experimental results.