

連続立体ラーメン免震橋の 車両走行時の振動特性

VIBRATION CHARACTERISTICS OF THE CONTINUOUS RIGID FRAME BRIDGE
WITH LEAD RUBBER BEARINGS UNDER MOVING VEHICLES

梶川 康男*、深田 宰史**、林 秀侃***、川北 司郎****、浜 博和*****
Yasuo KAJIKAWA, Saiji FUKADA, Hidenao HAYASHI, Shirou KAWAKITA and Hirokazu HAMA

*	金沢大学	工学部土木建設工学科	(〒920 金沢市小立野 2 丁目 40-20)
**	金沢大学大学院	自然科学研究科システム科学専攻	(同上)
***	阪神高速道路公団	保全施設部	(〒541 大阪市中央区久太郎町 4 丁目 1 番 3 号)
****	阪神高速道路公団	計画部	(同上)
*****	(株) フジエンジニアリング	調査設計部	(〒532 大阪市淀川区東三国 4 丁目 13 番 3 号)

The Hanshin/Awaji Earthquake caused extensive damage to many bridge of the Hanshin Expressway. Especially falling-down of superstructures and other destructive damage occurred at Benten Kouku which locates in downtown of Kobe. After the earthquake, the continuous 19-span space frame bridge with lead rubber bearings which has approximate 565m bridge length was reconstructed in this region. It is the first trial in Japan to use large lead rubber bearings as an isolator or as a damper at the bottom of the steel pier for the purpose of reduction of seismic force acting on this bridge. Therefore we had vibration test in this bridge under moving vehicles. Moreover the analytical model was made by finite element method, and simulation of dynamic response analysis was carried out. It can be observed that the results of the proposed analytical model which has girders, isolators and piers are in good agreement with the measurement ones.

Key Words : vibration characteristics, rigid frame bridge

1. まえがき

兵庫県南部地震¹⁾によって大被害を被った阪神高速道路 3 号神戸線弁天工区では、地震力の低減をはかるために橋脚基部に免震支承を設け、19 径間を連続とした道路橋としては世界ではじめての構造形式が採用された²⁾³⁾。本橋においては、耐震性の確認や地盤振動としての周辺環境への影響を把握するために様々な振動実験が行われた。耐震性の確認については、急速解放ジャッキによりその免震効果を確認しており、別途に報告されている⁴⁾。

本研究では、本橋のような橋脚形式における車両走行時の振動特性や地盤振動としての周辺環境への影響について報告する。今までの研究から、伸縮継手がない連続形式や門型橋脚においては、単純形式や T 型橋脚に比較して交通振動や騒音による周辺環境への影響が小さいと報告されている^{5) - 11)}。本橋の場合には、それらに加

えて主桁と橋脚が剛結されているため、桁端補強¹²⁾¹³⁾による振動軽減対策に値するものと考えられ、さらに橋脚基部においては免震支承を設けており、これらすべての要因からみても、周辺環境に対して交通振動や騒音の低減、車両走行性の向上にも効果があると考えられる。

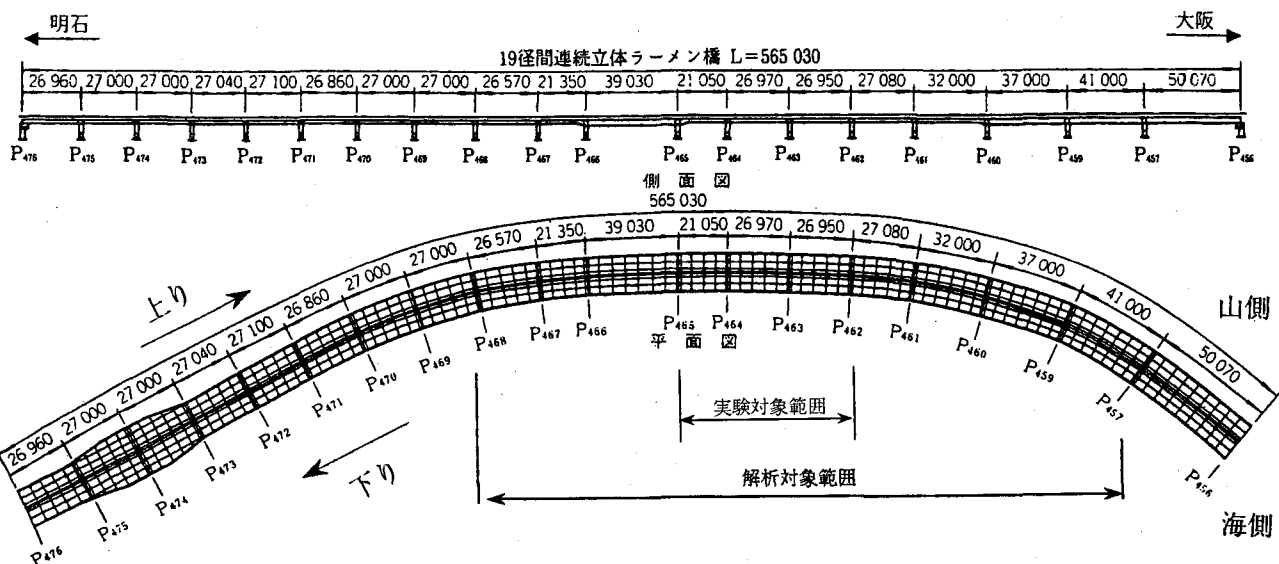
そこで本研究では、振動実験の結果と有限要素法を用いた解析とを比較することで、本橋の車両走行による上部構造や橋脚の振動特性を把握した。

2. 実験概要と対象橋梁

本研究は以下の目的により車両走行実験¹⁴⁾を行った。

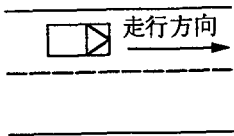
- ①橋脚と剛結構造となった上部構造の振動特性の把握
- ②車両走行による免震支承の変形挙動の把握
- ③橋脚基部に免震支承を配置したことによる振動の伝播経路の把握と周辺環境への影響の確認

測定項目としては、支承、橋脚横梁および脚柱の変位挙動と、主桁スパン中央（鉛直）、脚柱上部、脚柱基部および脚柱直下の地盤面の加速度（水平2方向）をサーボ型加速度計により測定し、さらに脚柱基部と橋脚脇に振動レベル計を設置した。対象橋梁の一般図を図-1に、

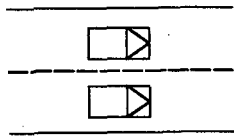


—802—

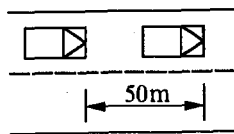
パターン：1 単独



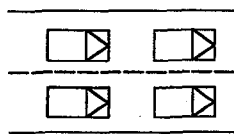
パターン：2 並走



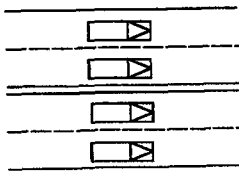
パターン：3 連行



パターン：4 連行・並走



パターン：5 4車線並走



＜走行ケース＞

パターン 1：20、40、60km/h

パターン 2：20km/h

パターン 3：40、60km/h

パターン 4：20km/h

パターン 5：20km/h

図-3 走行パターンと走行ケース

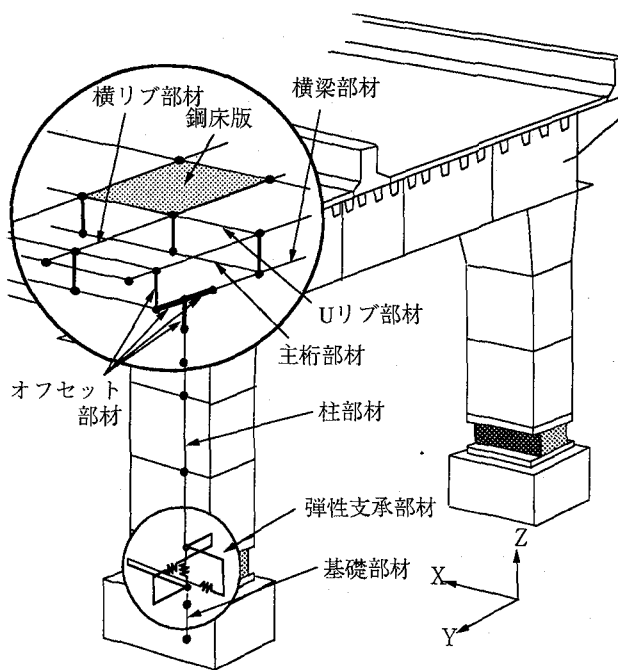


図-4 解析モデルの詳細図

解析に用いた免震支承の各ばね定数については、鉛直方向ばねでは設計値を、水平方向ばねについては支承単体の10mmせん断試験結果を参考に静的解析から決めた。

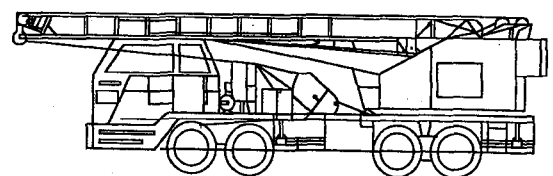
3.2 静的・固有値解析

走行パターン5のケースにおいて試験車4台が橋上を速度約20km/hで徐行したときに得られた橋脚横梁、スパン中央のたわみおよび支承の変位波形と解析値を比較して、解析モデルの剛性を確認した。さらにサブスペース法により固有値解析を行った^{16) 17)}。

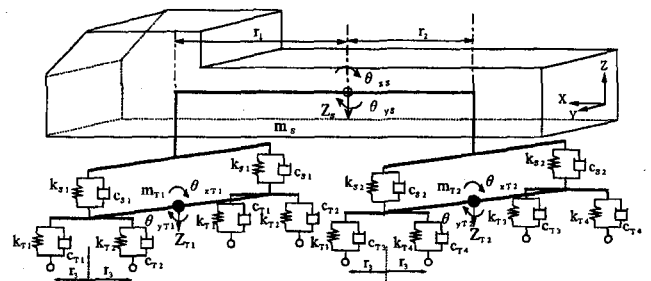
3.3 車両走行による動的応答解析

車両走行による動的応答解析では、図-6(a)に示すような試験車両を図-6(b)に示すように、前軸、後軸のばね上、ばね下を考慮した4軸の立体車両モデル¹³⁾を用いて、路面凹凸を考慮して直接積分法のニューマークβ法($\beta=1/4$, $\Delta t=0.01$)により、車両-橋梁系の運動方程式を逐次積分して応答値を求めた^{17) 19)}。

なお、減衰マトリックスは剛性依存型とし、各部材の減衰定数は、上部構造では $h=2\%$ 、免震支承および下部構造では $h=5\%$ とした⁹⁾。



(a) 実験時の試験車両



(b) 解析車両モデル

図-6 試験車のモデル化

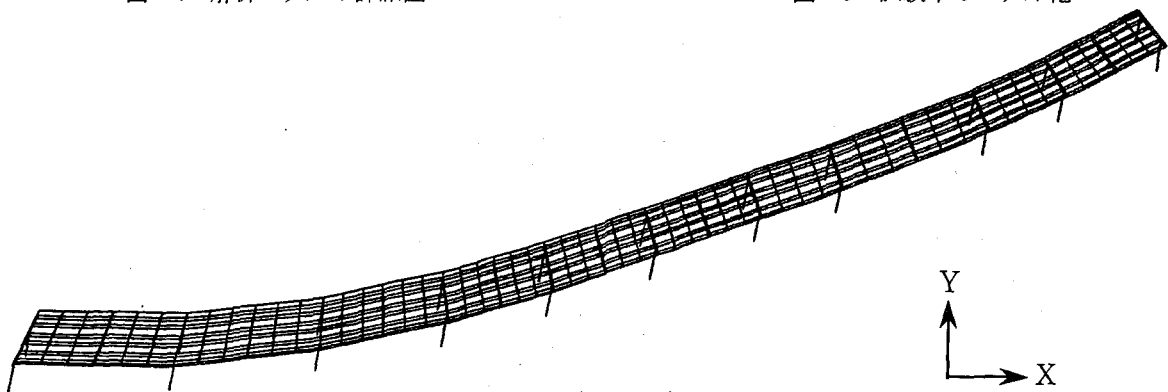
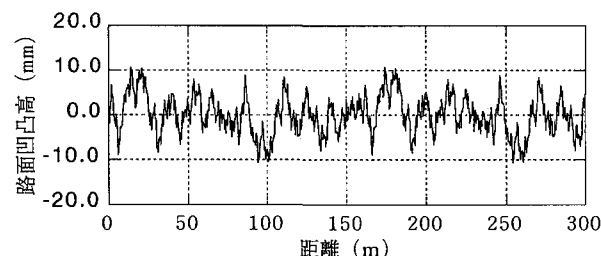


図-5 解析モデル

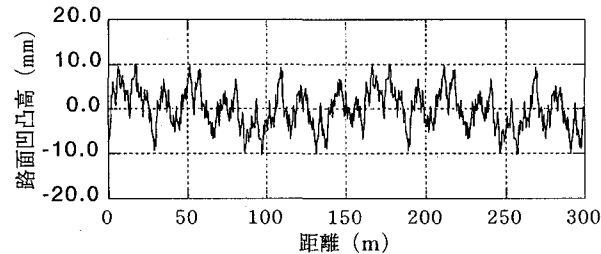
路面凹凸に関しては、実測値がないために解析により作成したものを用いた。解析では、立体車両モデルを用いているために、左右の車輪には異なった路面凹凸上を走行するようにした。ここで、式(1)によりモデル化した路面凹凸のパワースペクトル密度 $S_r(\Omega_k)$ に対して、実験時には舗装完成直後であることを考慮して、文献²⁰⁾を参考にして“良好”な路面状態に対する値を用いることにした。図-7(a)、(b)に、車両モデルが走行する左右の車輪に用いた路面凹凸波形を示す。

$$S_r(\Omega_k) = \begin{cases} b_1 / \Omega^{n_1} & \Omega_L \leq \Omega \leq \Omega_c \\ b_2 / \Omega^{n_2} & \Omega_c \leq \Omega \leq \Omega_U \end{cases} \quad (1)$$

ここに、
 $b_1 = 1.67$ 、 $b_2 = 0.005$ 、 $n_1 = 0$ 、 $n_2 = 1.94$ 、
 $n = 200$ 、 $\Omega_L = 0.0$ 、 $\Omega_c = 0.05$ 、 $\Omega_U = 2.5$



(a) 左車輪



(b) 右車輪

図-7 解析に用いた路面凹凸波形

4. 実験・解析結果

4. 1 静的特性

試験車4台が、走行速度約20km/hで走行パターン5(図-3 参照)の状態を保って上り方向に徐行したときのP 463～P 464 径間のスパン中央G 3 桁の鉛直変位を図-8 に、P 463 橋脚横梁中央の鉛直変位を図-9 に、P 463 橋脚山側脚柱の免震支承の鉛直変位を図-10 にそれぞれ示す。また、比較として解析によって得られた変位波形を同図に付記する。

これより、橋脚横梁については差異があるものの、主桁スパン中央や免震支承部の鉛直変位においては、その剛性評価の妥当性が示された。これより、免震支承部の鉛直ばね剛性においては設計値をそのまま用いれば良いことがわかった。また、図-8 のスパン中央の鉛直変位波形からは連続桁的な変位性状がみられ、車両が対象径間前後の径間を走行している際も実験値と解析値はほぼ一致していることがわかる。

一般に、門型橋脚の場合には橋脚横梁に走行荷重が載荷されるために橋脚横梁では鉛直変位が生じる。本橋の場合、主桁と橋脚横梁が剛結されているため、総重量約372kN(約38tf)の試験車が4台並列載荷した時のたわみは実測値で1.8mm程度であった。免震支承の鉛直変位分(0.5mm)を差し引いた橋脚横梁のみのたわみは、実測値で1.3mm程度であり、その剛性が大きいことがわかる。よって、図-9 で差異が生じた理由として、主桁と橋脚横梁との剛結部の評価に差異があったものと考えられる。

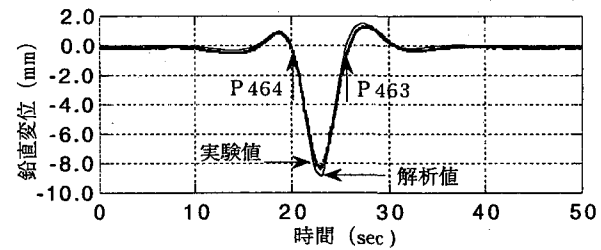


図-8 P 463～P 464 径間のスパン中央の鉛直変位

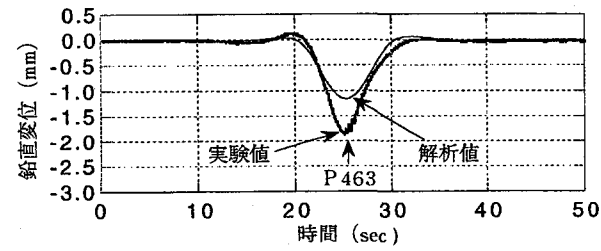


図-9 P 463 橋脚横梁中央の鉛直変位

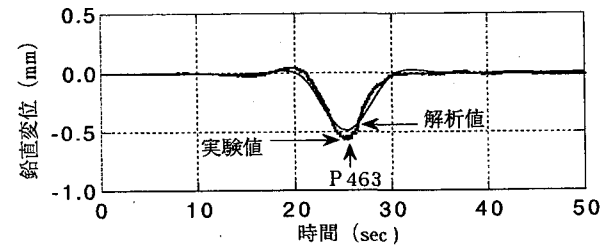


図-10 免震支承 (P 463 山側脚柱) の鉛直変位

免震支承部にもなる変形特性として、上述した試験車4台が、徐行した時のP463橋脚の断面および側面のみた変位性状を図-11(a)、(b)に示す。また、それらの実験値と解析値の比較を表-1にそれぞれ示す。図-11(a)をみてもわかるように橋脚横梁のたわみにともない、免震支承が橋軸直角方向に変位(矢印方向:+)しており、門型橋脚の脚柱基部が外側に開いている様子がわかる。また、図-11(b)の側面からみた変形性状は、主桁と免震支承との中立軸の食い違いにより主桁がたわむことで、免震支承が橋軸方向に変位していることがわかる^{7) 9)}。これらの傾向は、表-1に示した解析でもよく表れており、免震支承部の水平ばね剛性の評価においては、免震支承単体の10mmせん断試験から得られたたね剛性より5倍程度大きな値となった。実験、解析ともに山側、海側で値が異なる理由としては、脚柱の位置が非対称で、さらに横断勾配を有していることが挙げられる。

表-1 実験値と解析値の比較

測点	解析値	実測値
1	-1.16	-1.85
2	0.16	0.22
3	0.10	0.28
4	0.25	0.57
5	0.29	0.79
6	-8.89	-8.20
7	-1.62	-2.01

単位: mm, 矢印方向: +

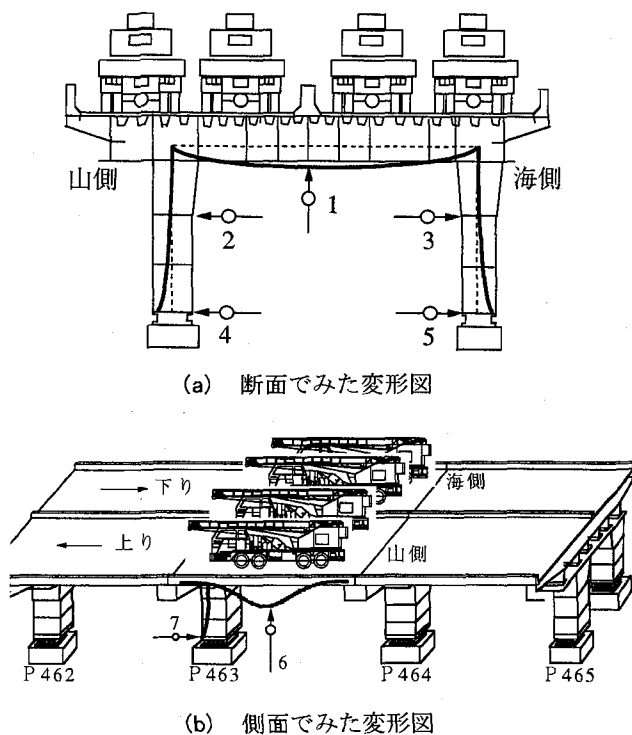


図-11 免震支承部の変形状

4. 2 主桁・橋脚の振動特性

試験車 1 台が、上り線の走行車線を走行速度 60km/h で逆走行した時の P463 橋脚に着目して、前後径間のスパン中央の鉛直方向の加速度とその伝播経路として P463 山側脚柱上部、基部、地盤 (図-12 参照) の橋軸および橋軸直角方向の加速度を図-13 に、そのスペクトルを図-14 にそれぞれ示す。さらに、追越車線を走行したときの上述した各測点のスペクトルを図-15 に示す。

本橋は主桁と橋脚が剛結された連続桁となっているために、主桁上 (測点 1、2、図-12 参照) における加速度波形では、伸縮継手を通過するときの衝撃的な波形がみられなく、車両走行による振動伝播の影響範囲は各測点の前後約 3 径間くらいとなっており、上部構造の剛性がかなり大きいといえる。また、脚柱上部 (測点 3) の加速度波形においては、橋軸および橋軸直角方向の振動振幅はほぼ同じくらいになっており、本橋の平面線形がかなり影響しているものとみられる。また、脚柱基部 (測点 4) では橋軸方向で、脚柱上部よりも振動振幅が増幅しているのがわかる。これは、前節で述べた主桁のたわみ分の橋軸方向変位が影響しているものとみられる。しかし、追越車線を走行しているときにはかなり振幅が小さくなっていった。一方、橋軸直角方向では、脚柱上部に比べて振幅は小さくなっている。さらに、地盤上 (測点 5) では橋軸および橋軸直角方向において、他の測点と比較してみるとかなり振動振幅が小さくなっている。

次に、各測点のスペクトルから、卓越している振動モードを調べることにした。本橋は 19 径間連続となっているために、これらのスペクトルからモード形状を明らかにすることは困難であると判断し、解析上でこの対象径間において卓越している振動モードを推定することにした。固有値解析により得られた、本実験の対象径間に影響していると考えられる振動モード図と解析における固有振動数を図-16 に示す。

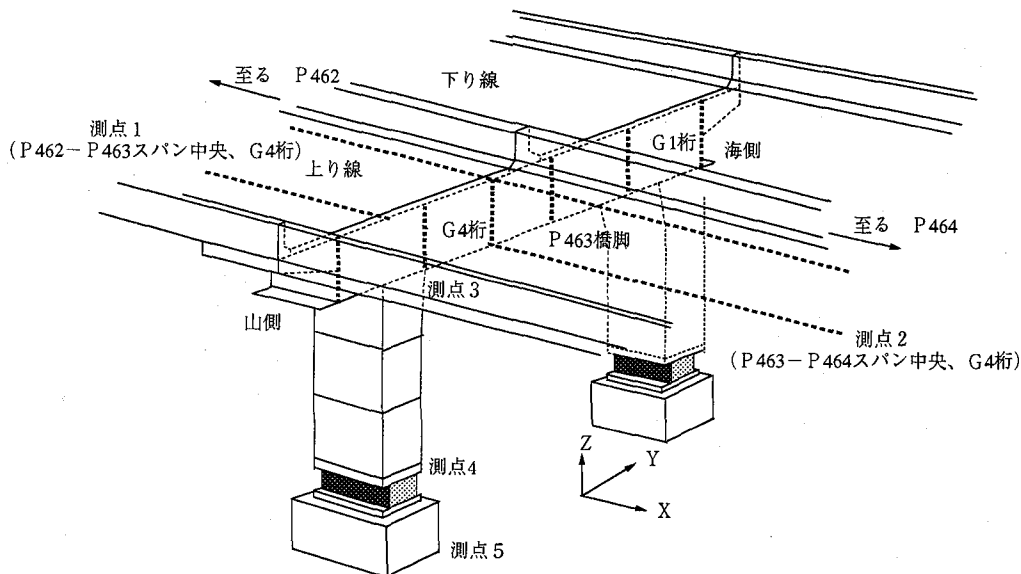
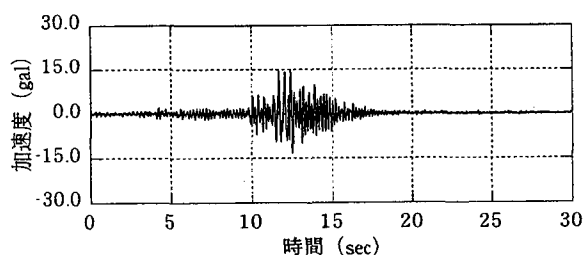
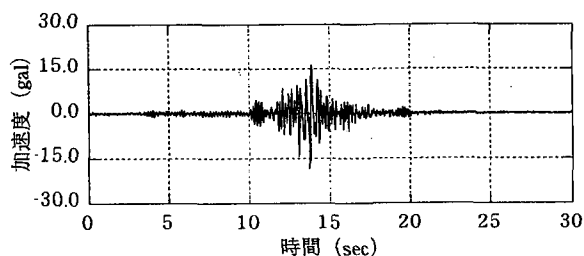


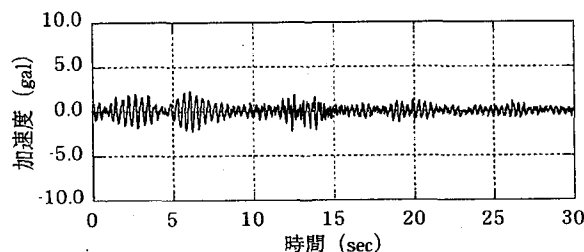
図-12 測点配置の状況



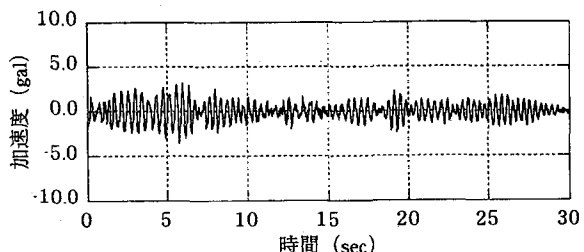
(a) 測点1 (P462~P463 径間スパン中央G 4 桁、鉛直)



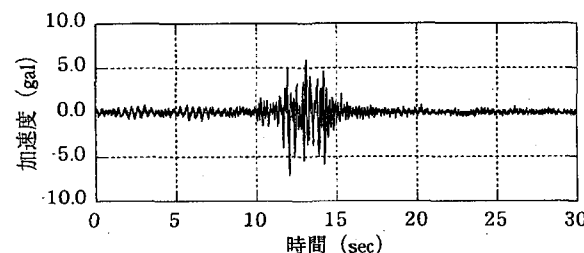
(b) 測点2 (P463~P464 径間スパン中央G 4 桁、鉛直)



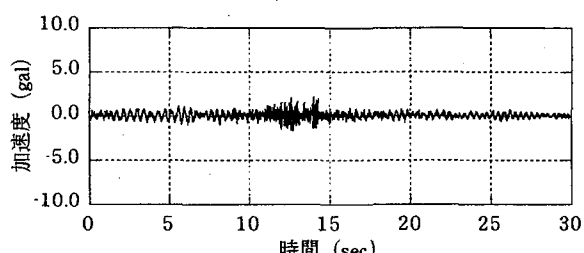
(c) 測点3 (P463 山側脚柱上部、橋軸)



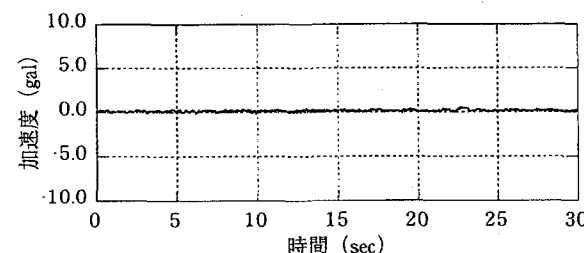
(d) 測点3 (P463 山側脚柱上部、橋軸直角)



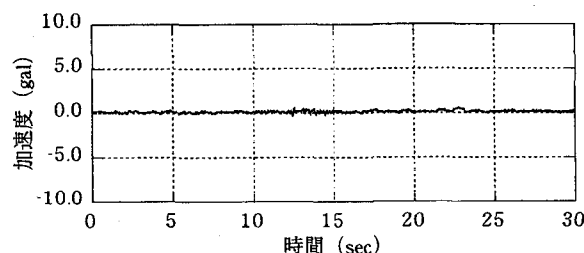
(e) 測点4 (P463 山側脚柱基部、橋軸)



(f) 測点4 (P463 山側脚柱基部、橋軸直角)

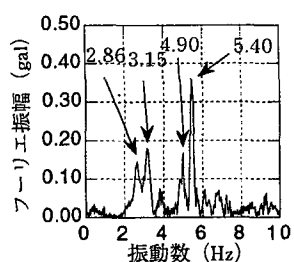


(g) 測点5 (P463 山側脚柱地盤上、橋軸)

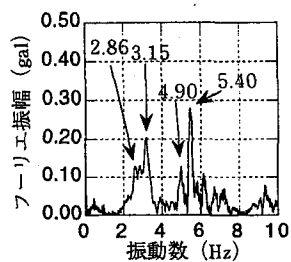


(h) 測点5 (P463 山側脚柱地盤上、橋軸直角)

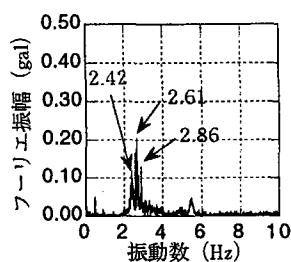
図-13 走行車線走行時の各測点における加速度波形 (実験)



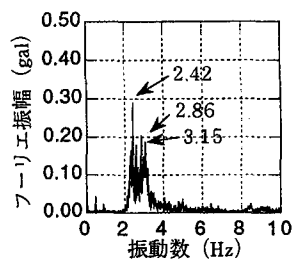
(a) 測点1 (鉛直)



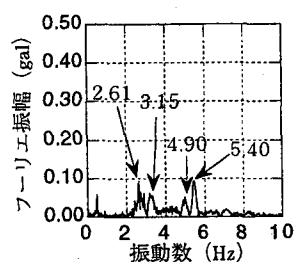
(b) 測点2 (鉛直)



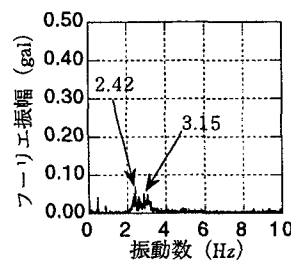
(c) 測点3 (橋軸)



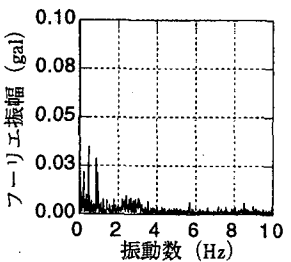
(d) 測点3 (橋軸直角)



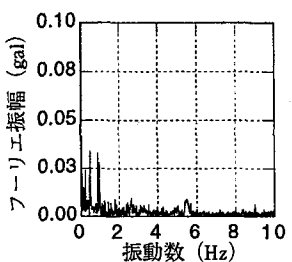
(e) 測点4 (橋軸)



(f) 測点4 (橋軸直角)



(g) 測点5 (橋軸)



(h) 測点5 (橋軸直角)

図-14 走行車線走行時の各測点におけるスペクトル (実験)

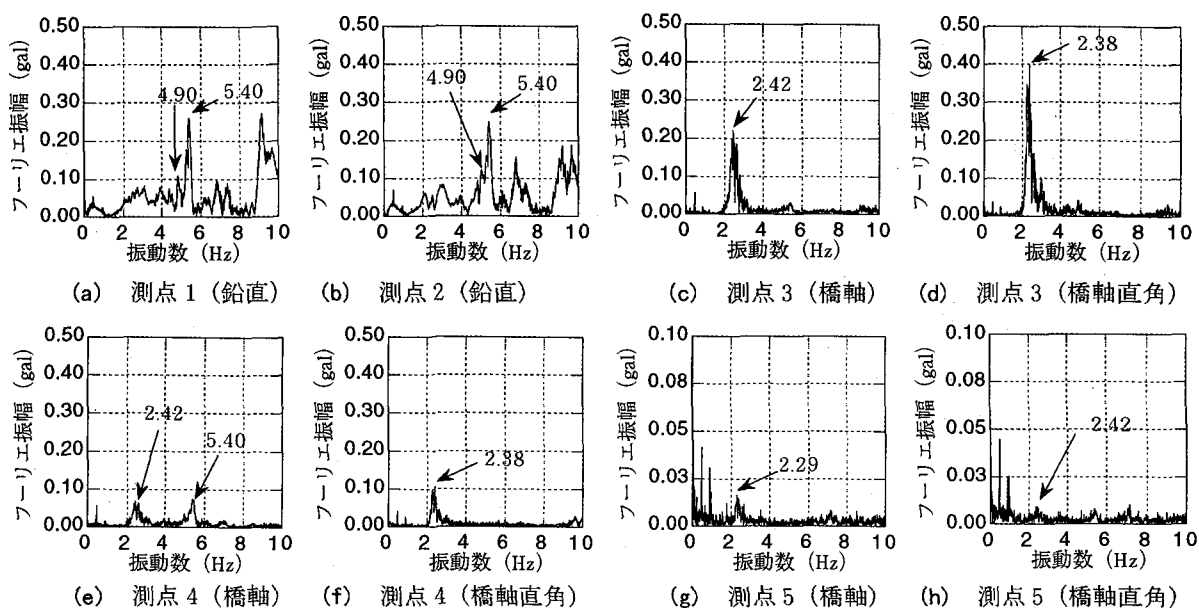


図-15 追越車線走行時の各測点におけるスペクトル (実験)

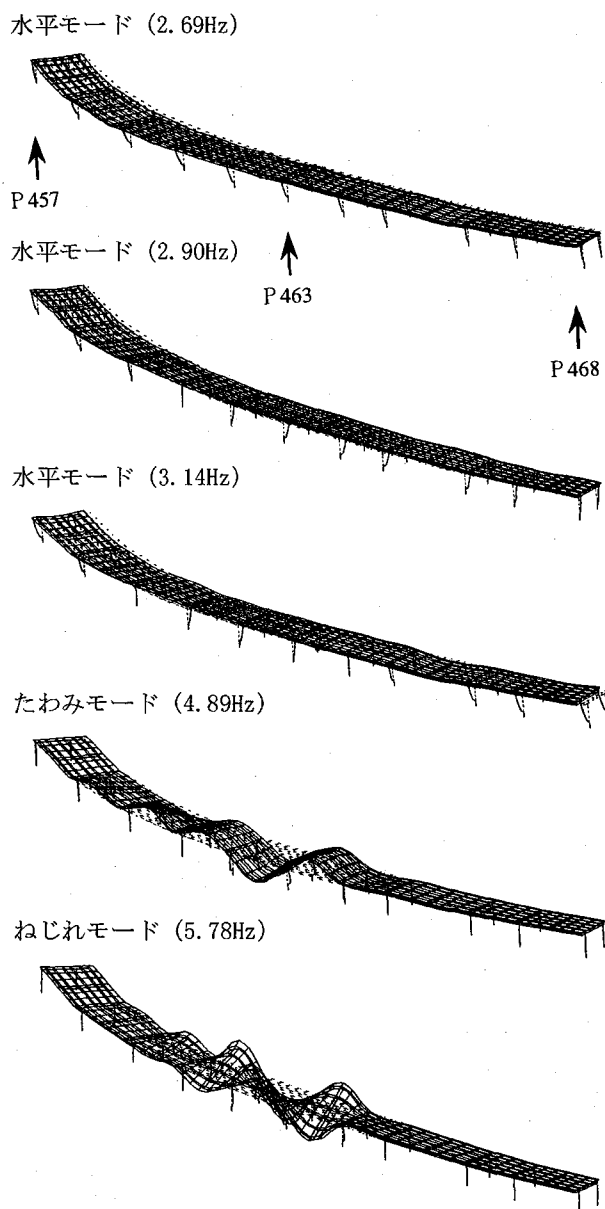


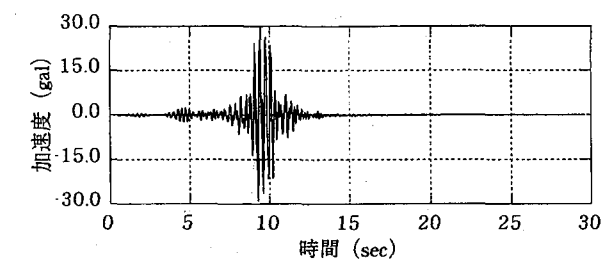
図-16 振動モード図

図-14(a)～(f)のスペクトルを見ると、試験車のばね上振動数 (2.8Hz 付近) の卓越が大きく、試験車両からは観測されなかった 3.15Hz の振動数が励起している。この 3.15Hz の振動数は脚柱上部 (測点 3) の橋軸直角方向においてもその励起がみられ、さらに図-15(a) (b) に示した追越車線走行時にはその卓越がみられないことから、橋軸直角方向の振動モードと判明した。また、脚柱上部や基部の橋軸および橋軸直角方向のスペクトルでは、2.5Hz 前後に卓越振動数が大きく分布していることから、これらの振動モードも、橋軸方向および橋軸直角方向に振動するスウェイおよびロッキングの振動モードとみられる。スウェイ振動は、対象橋脚の前の径間上を車両が走行することで主桁のたわみにより、その橋脚を押し出すことで加振されて励起する。また、ロッキング振動は本橋の横断勾配による影響により橋軸直角方向に加振されて励起したものと考えられ、本橋の平面線形によりこれら 2 つのモードが、互いに連成してスペクトルに表れているものとみられる。

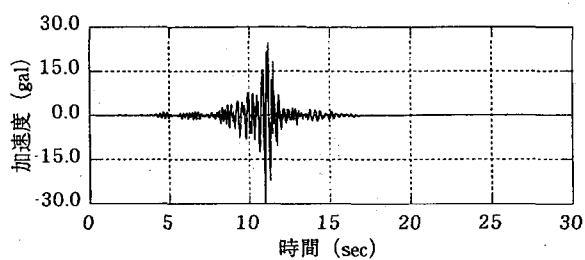
図-16 に示すように、固有値解析からは 2.69Hz ～ 3.14Hz にかけて、上述したような振動モードが 3 つ存在しているが、本橋は 19 径間連続となっており、本解析モデルはその一部を取り出したものであるため、全く同じモードが実際にも影響しているとはいえないが、これに近い振動モードが影響していると考えられる。

次に、上部構造主桁部の振動モードについて検討した。スペクトルから、4.9Hz と 5.4Hz に卓越がみられるが、これは図-16 に示したモード図からたわみとねじれのモードが卓越したものと判明した。実測データからも 5.4Hz においてはねじれを確認しており、本橋は横断勾配があるために、その影響によりねじれモードの方がスペクトルエネルギーが大きく出たとみられる。

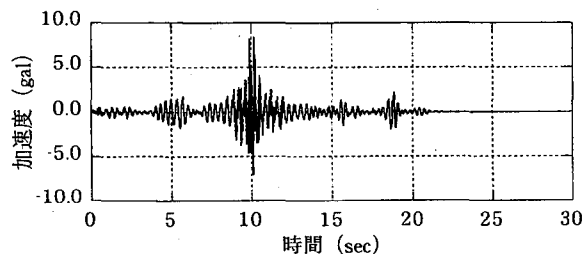
また、実験値に対応して、試験車 1 台が上り線の走行車線を走行速度 60km/h で逆走行した時の上述した各測



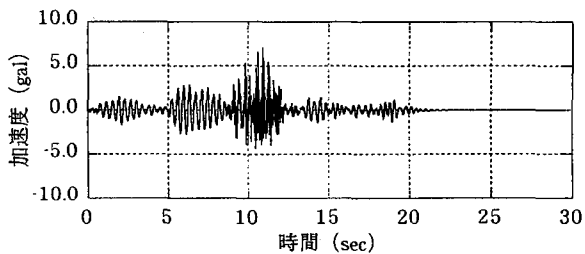
(a) 測点1 (P462~P463 径間スパン中央G 4 桁、鉛直)



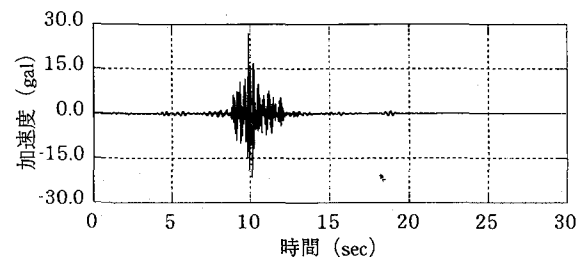
(b) 測点2 (P463~P464 径間スパン中央G 4 桁、鉛直)



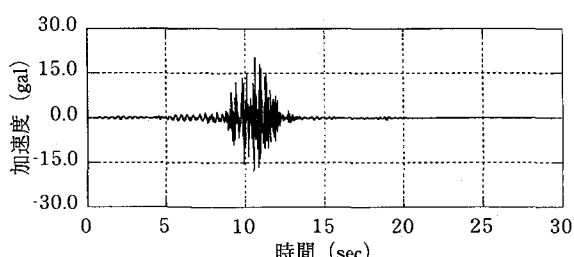
(c) 測点3 (P463 山側脚柱上部、橋軸)



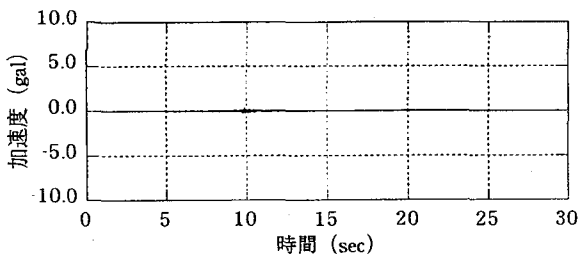
(d) 測点3 (P463 山側脚柱上部、橋軸直角)



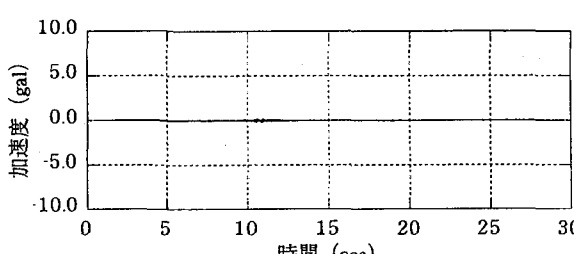
(e) 測点4 (P463 山側脚柱基部、橋軸)



(f) 測点4 (P463 山側脚柱基部、橋軸直角)

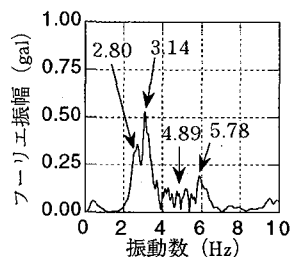


(g) 測点5 (P463 山側脚柱コンクリート部、橋軸)

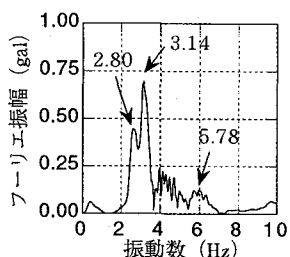


(h) 測点5 (P463 山側脚柱コンクリート部、橋軸直角)

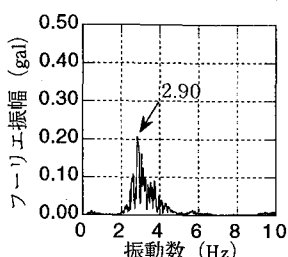
図-17 走行車線走行時の各測点における加速度波形 (解析)



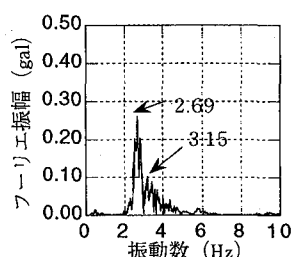
(a) 測点1 (鉛直)



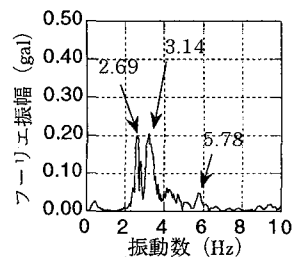
(b) 測点2 (鉛直)



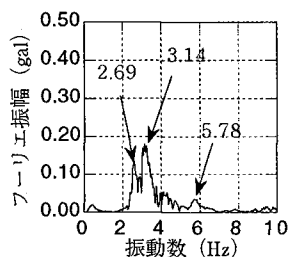
(c) 測点3 (橋軸)



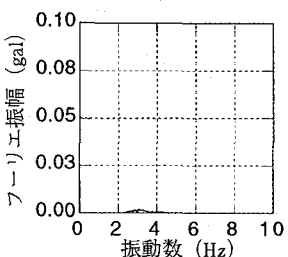
(d) 測点3 (橋軸直角)



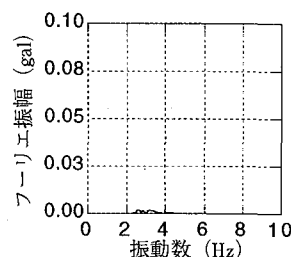
(e) 測点4 (橋軸)



(f) 測点4 (橋軸直角)



(g) 測点5 (橋軸)



(h) 測点5 (橋軸直角)

図-18 走行車線走行時の各測点におけるスペクトル (解析)

点における解析上の加速度応答値とそのスペクトルを図-17と図-18にそれぞれ示す。なお、本解析では地盤上での応答値を得ることができないために、地盤に最も近い免震支承下のコンクリート橋脚部に着目した。

以上の解析結果から、解析における主桁スパン中央の加速度波形では車両ばね上振動数に影響されて、橋軸直角方向モードのスペクトルが大きくなっており、ねじれやたわみ振動数のスペクトルエネルギーは実験値に比べて小さめである。しかし、図-19に示した測点2の径間の外桁（G1桁）のスペクトルからは、車両の影響が小さく、ねじれとたわみモードが大きく励起しており、実験値に近い傾向を示している。また、脚柱基部の加速度においては脚柱上部に比べてかなり増幅しており、実測値に比べて大きめである。したがって、車両走行時の免震支承の減衰機構がどの程度のものなのかまだまだ検討の余地がある。

以上から、本橋の振動特性として、実験値、解析値ともに免震支承に起因して橋脚の橋軸および橋軸直角方向モードの卓越がみられたが、地盤面では実験値の加速度振幅も小さくなっており、その卓越がほとんどないことから、周辺環境への影響は少ないと思われる。

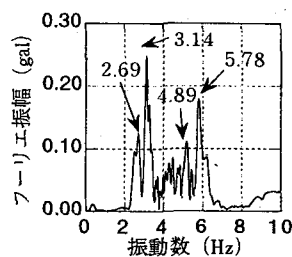
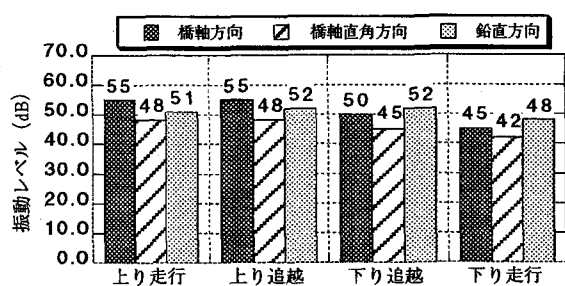


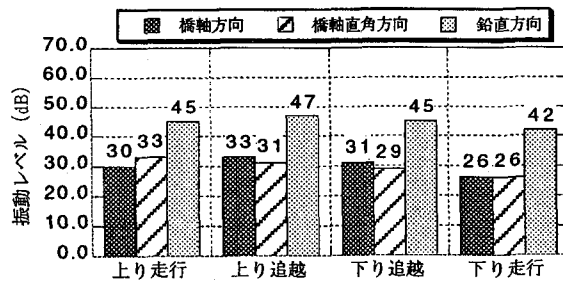
図-19 測点2のG1外桁のスペクトル（解析）

4.3 振動レベル

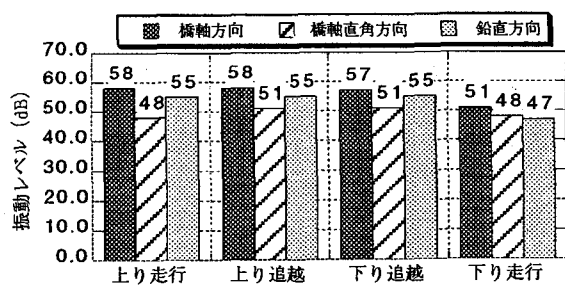
試験車1台が、上り、下りの走行、追越車線を各速度（20、40、60km/h）で走行したときのP463脚柱基部と地盤上（図-2▲印参照）における方向別の振動レベルの最大値を図-20に示す。これより、脚柱基部においては、橋軸直角方向（Y方向）よりも橋軸方向（X方向）が大きくなっており、速度の増加に伴って増加傾向にある。一般に、門型橋脚は橋軸直角方向の剛性大きいことと、先に述べたたわみにともなう橋軸方向変位の影響により、橋軸方向に振動するスウェー振動の方が大きく励起したとみられる⁸⁾。また、振動レベル計は上り線側の山側脚柱に設置しているために、上り線を走行したときが最も



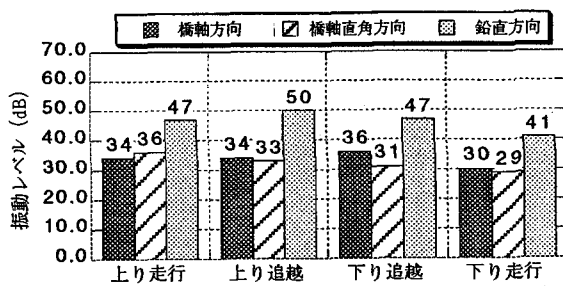
(a) 橋脚基部 20km/h 走行



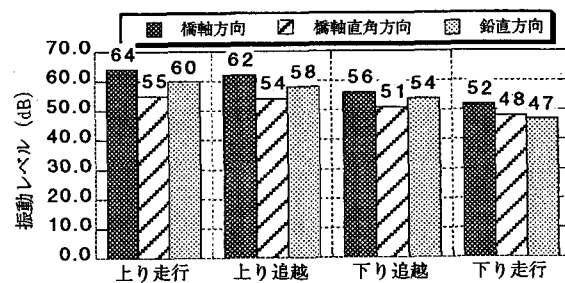
(b) 地盤上 20km/h 走行



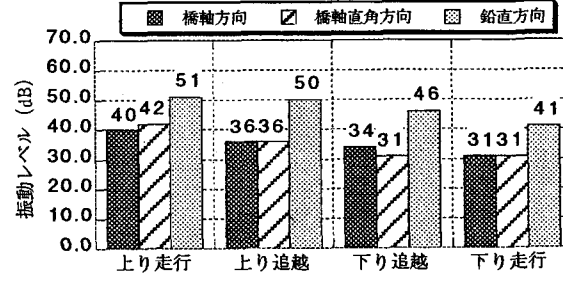
(c) 橋脚基部 40km/h 走行



(d) 地盤上 40km/h 走行



(e) 橋脚基部 60km/h 走行



(f) 地盤上 60km/h 走行

図-20 試験車単独走行時の振動レベル

大きく、この車線から遠くなるにしたがって振動レベルも小さくなっており、このときの振動レベルの差は、走行速度が増加するのに伴って顕著に表れている。

一方、地盤上では脚柱基部に比べて振動レベルがかなり小さくなっている。また、橋脚基部とは違って水平方向よりも鉛直方向（Z方向）の方が大きくなっており、走行速度の増加にともなう振動レベルの増加量は橋脚基部より小さい。

5. まとめ

本研究では、橋脚基部に免震支承を設けた連続立体ラーメン免震橋について、橋脚の一部を対象として、車両走行による振動実験を行い、シミュレーションにより求めた解析値と実験値を比較することで、本橋の上部構造や橋脚の振動特性を把握した。

本研究により明らかになった事項は次の通りである。

- (1) 試験車が徐行したときの挙動と、静的解析により得られた結果を比較することで剛性の確認をし、さらに本橋の門型橋脚としての特性を把握した。
- (2) 振動レベル計の計測値から、3方向のうちで脚柱基部においては橋軸方向が最も大きな値を示していたが、地盤上では鉛直方向が大きくなっていた。
- (3) 本橋は、平面線形、縦断線形を有する特殊な橋梁であるために、主桁、橋脚を含めた立体骨組構造モデルを構築して、立体車両モデルによる動的応答解析を行った。その結果として、実験時の挙動に近い傾向を解析上で得ることができた。
- (4) 実験、解析から2～3Hzに免震支承に起因した橋軸および橋軸直角方向モードが卓越していることがわかったが、地盤上ではそのエネルギーが小さくなっており、周辺環境に及ぼす影響は少ないことがわかった。

謝辞：実験時に協力頂いた関係者各位に心より謝意を表わします。

<参考文献>

- 1) Kawashima, K. and Unjoh, S. : Impact of HANSHIN/AWAI Earthquake on Seismic Design and Seismic Strengthening of Highway Bridges, Proc. of JSCE, No. 556/I-38, pp.1-30, 1997.1.
- 2) 林秀侃・川北司郎：阪神高速3号神戸線弁天工区の復旧事例、橋梁と基礎、Vol.30, No.8, pp.48-52, 1996.8.
- 3) 林秀侃・川北司郎・林田充弘：弁天高架橋の設計施工概要、土木技術、Vol.52, No.2, pp.57-64, 1997.2.
- 4) 林秀侃・川北司郎・中東剛彦・真田健司・浜博和：19径間連続立体免震橋の振動実験、第1回免震・制震コロキウム講演論文集、pp.63-70, 1996.11.

- 5) 讃岐康博・梶川康男・新開正英・岩津守昭：ジョイントレス工法の防振対策工としての妥当性の検討、第2回振動制御コロキウム講演論文集 PART B, pp.151-158, 1993.
- 6) 徳永法夫・西村昂・江上輝男・刑部清次：既設単純鈎桁の主桁連結工法による超多径間化に関する一考察、橋梁と基礎、Vol.31, No.4, pp.21-30, 1997.
- 7) 横山功一・井上純三・伊関英彦：高架道路の交通振動特性と振動軽減対策に関する実測調査、土木技術資料、Vol.30, pp.41-46, 1988.4.
- 8) 深田幸史・梶川康男・吉川実・林秀侃・薄井王尚：阪神高速道路の各種高架橋の振動特性の比較、橋梁振動コロキウム論文集、pp.167-174, 1997.10.
- 9) 梶川康男・深田幸史・林秀侃・吉川実・薄井王尚：弾性支承と桁連結構造を用いた既設高架橋の振動特性、構造工学論文集、Vol.43A, pp.747-756, 1997.3.
- 10) 山本悟司：既設橋梁の連続化、橋梁と基礎、Vol.28, No.8, pp.163-166, 1994.
- 11) 久保雅邦・梶川康男・岩津守昭・関本宏：既設の鋼単純桁の連結化による交通振動軽減対策工法の開発、振動制御コロキウム PART B 講演論文集、pp.15-22, 1991.
- 12) 佐藤弘史・澤田憲文・今野久志・長尾彰洋：高架橋の桁端部補強による道路交通振動の軽減対策、土木技術資料、Vol.37, PP.58-63, 1995.5.
- 13) 山田靖則・川谷充郎：桁端補強工法による橋梁交通振動軽減の解析的研究、構造工学論文集、Vol.43A, pp.737-746, 1997.3.
- 14) 加藤雅史・島田静雄：橋梁の現地振動実験法、土木学会誌、Vol.66, No.2, pp.38-42, 1981.2.
- 15) 梶川康男・大嶋信太郎：周辺環境への影響を考慮した高架橋の防振効果に関する一解析法、土木学会論文報告集、第341号、pp.79-86, 1984.
- 16) 林川俊郎・角田興史雄・松井義孝：3次元連続高架橋の基本固有周期の算定について、構造工学論文集、Vol.38A, pp.743-753, 1992.
- 17) K. J. Bathe/E. L. Wilson 著・菊池文雄 訳：有限要素法の数値計算、科学技術出版社、1979.
- 18) 橋梁振動研究会編：橋梁振動の計測と解析、技報堂出版、1993.
- 19) 中島章典・津村直宜：車両・橋梁系振動問題のためのシミュレーション法についての一考察、構造工学論文集、Vol.38A, pp.781-788, 1992.
- 20) 本田秀行・城戸隆良・梶川康男・小堀為雄：道路橋の路面凹凸パワースペクトル密度に関する調査、土木学会論文報告集、第315号、PP.149-155, 1981.11.

(1997年9月26日受付)