

# 高架橋の振動性状に関する実験的検証

大阪第二建設部 調査課 南 莊 淳  
(前)大阪管理部保全第一課)

## まえがき

近年ますます高速道路周辺における振動公害が大きな問題となっており、その原因の究明と対策が急がれている。

しかし、高架橋の道路交通振動に対しては、構造物と周辺地盤の振動性状や伝播特性など、まだ、十分に解明されているとは言い難い。そこで、補修工事のため通行止した供用路線、および建設中路線の上部工架設前後において、今後の応答解析や防振設計上の基礎資料を得るために、次のようないくつかの実験を実施した。

すなわち、(1)橋脚をワイヤーで引張る自由振動実験、(2)加振機による強制振動実験、(3)試験車による車両走行実験である。なお、構造物および周辺地盤に測点を設置し、その測定結果を用いて分析を行った。

その結果、橋脚および周辺地盤の振動は、上部工の1次固有振動に大きく支配されていること、3 Hz 前後の周波数成分をもつ振動が発生源から受振点に至るまで卓越して伝播していることなどが明らかとなった。

また、隣接する上部構造が異なる固有振動数をもつ場合には、制振効果が期待できる場合もあるという興味深い結果も得られた。

## 1. 単柱橋脚振動実験

### 1-1 実験概要

阪神高速道路の標準的な構造形式は、杭基礎—RC単柱橋脚—鋼単純合成桁(RC床版)である。そこで、昭和55年8月、補修工事に伴い通行止を

実施した西大阪線の橋梁で、基礎的な振動実験を行った。<sup>1)</sup>

また、この実験結果から、構造物および地盤の振動が上部工の影響を強く受けていることが判明した。そこで、西大阪線の実験に引き続き、昭和55年9月および昭和56年5月に、大阪西宮線(神戸線)の建設中の路線において、上部工架設前後の振動性状の変化を調査した。<sup>2)</sup>

図-1に実験場所位置図を、表-1および図-2に対象構造物の構造諸元を示す。

表-1 対象構造物の構造諸元

		西P-79	大P-25
路線名		西大阪線	大阪西宮線(神戸線)
場所		大阪市港区弁天町1丁目	大阪市福島区玉川1丁目
型式		鋼I型単純合成桁	(大阪側)単純鋼床版箱桁 (神戸側)3径連続鋼床版I型
スパン	部	33.5m(桁長32.9m)	(大阪側)60.2m(桁長)
	部		(神戸側) 37.5m+38.0m+37.5m
桁高		1.9m	2.5m
幅員		15.9m	19.0m
床版		180mm RC床版	鋼床版
舗装		75mmアスファルト	80mmグースアスファルト
橋脚型式		RC、T型単柱	RC、T型単柱(非対象)
はり	部	15.0m×2.7m×2.2m	18.9m×4.2m×3.8m
	部	2.4m×2.4m×4.59m	2.75m×3.8m×8.24m
フーチング		9.0m×7.5m×2.0m	11.5m×14.5m×3.0m
場所打杭		φ1m×34m×12本	φ1m×29.5m×36本

### 1-2 実験項目

振動実験の種類は、下部工への加振方法により、次の3つに区分して実施した。

#### 1. 自由振動実験

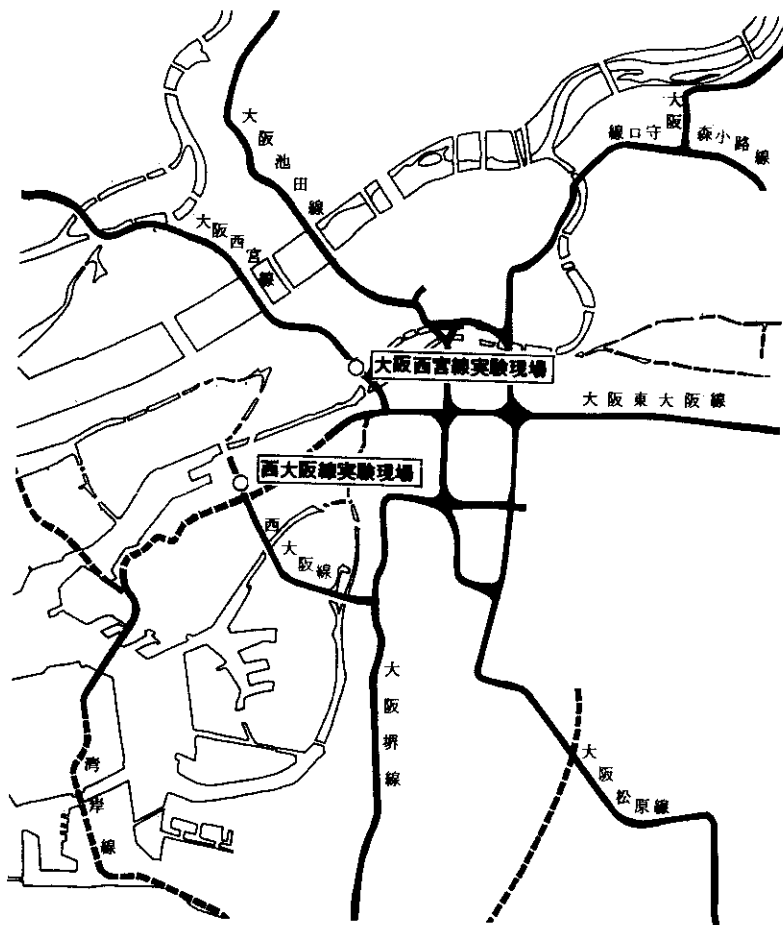


図-1 実験場所位置図

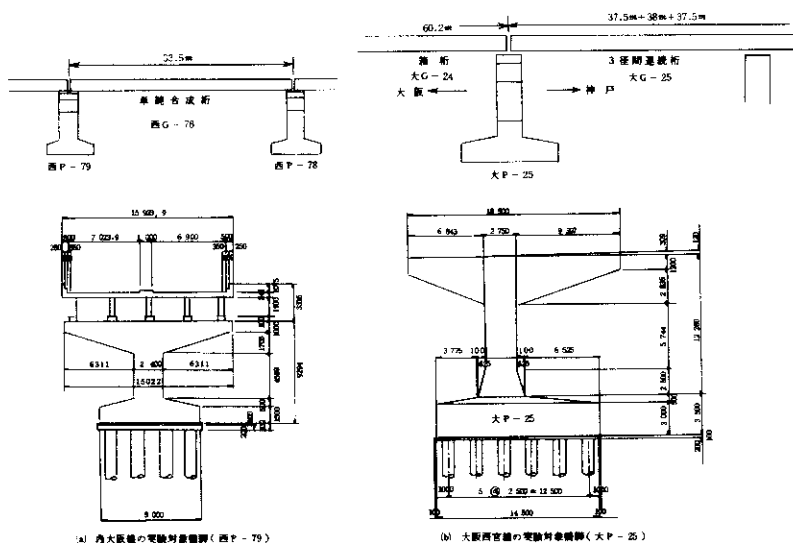


図-2 実験対象構造物一般図

2. 強制振動実験
3. 車両走行実験

以下にこれらの実験内容について記述する。

(1) 自由振動実験

自由振動実験は、隣接する橋脚を利用して、実験橋脚本体にあらかじめ静的な変位を与え、瞬時に開放することによって生ずる自由減衰振動を計測し、橋脚の固有周期、減衰定数、振動モードを読み取るものである。

橋脚に初期変位を与える方法としては、一般的な引き綱法を用いた。

西大阪線では、図-3 に示すように、実験

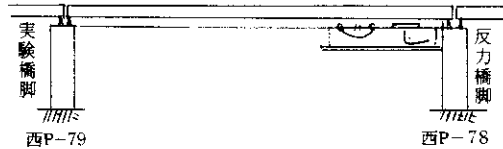


図-3 引き綱法による自由振動実験(西大阪線)

橋脚(西P-79)から反力橋脚(西P-78)まで水平にワイヤーロープを張り引張力5tで切断させた。

また、大阪西宮線の実験では、図-4に示

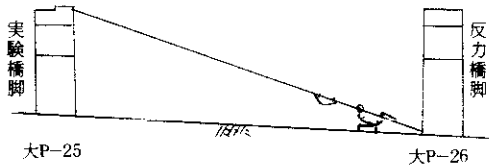


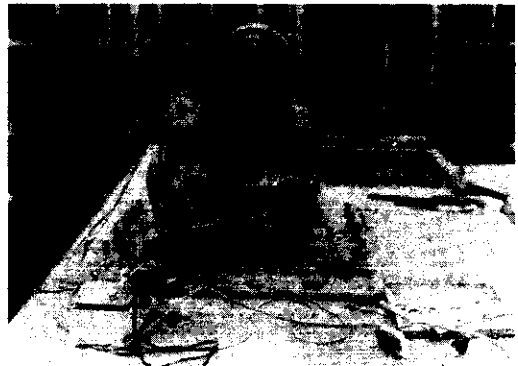
図-4 引き綱法による自由振動実験  
(大阪西宮線)

すように、実験橋脚(大P-25)から反力橋脚(大P-26)に斜めにワイヤーロープを張り引張力5tで切断させた。

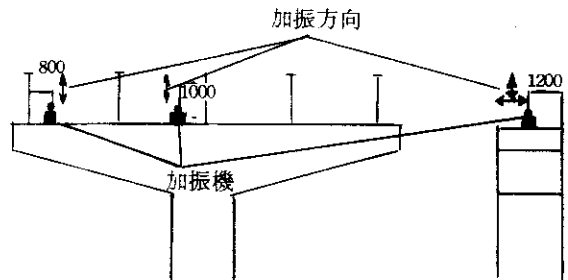
(2) 強制振動実験

強制振動実験は、加振機により橋脚本体を加振し、直接共振曲線を作成して、構造物の減衰定数、固有振動数および共振時の振動モードを求めた。

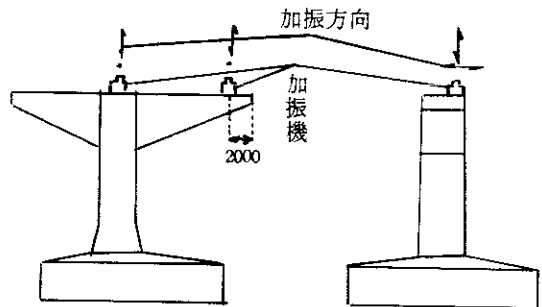
この実験では、写真-1に示すような不平衡質量型加振機を用いて加振した。



加振位置は、図-5に示すように梁中央と梁先端部とし、加振方向は上下動および橋軸方向水平動とした。



(1) 西大阪線



(2) 大阪西宮線

図-5 加振機設置位置

加振方法は、図-6に示すように加振機の回転数を段階上に変化させるStep加振と、回転数を最高点まで上昇させたのち、駆動電源を切り自然減速させるDamping加振の2

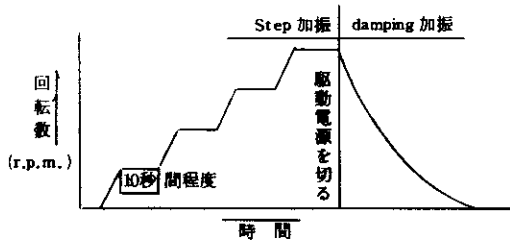


図-6 Step 加振と damping 加振の方式通りとした。

(3) 車両走行実験

高速道路上を車両が走行すると、(1)ジョイント通過時の衝撃振動、(2)スパン中央部通過時のたわみ振動、(3)車両のパネ上、パネ下振動等の不規則振動が発生する。そこで試験車を走行させて構造物や周辺地盤の振動を計測することにより、これらの振動特性、振動伝播特性を把握することとした。

実験内容を表-2に示す。

表-2 車両走行実験諸元

	西大阪線	大阪西宮線
車種	大型ダンプトラック	大型ダンプトラック
総重量	21.46 t (計量)	20 t
走行速度	40Km/h, 60Km/h, 70Km/h	40Km/h, 60Km/h
走行位置	下り走行、下り追越	上り走行、下り追越

1-3 測定項目と測定計器の配置

測定項目は、主として振動変位と振動加速度であり、西大阪線では静的変位についても測定した。

測定計器の配置は、上部工、下部工、地盤と振動伝播経路に設置した。表-3、図-7、図-8に測定項目、測定機器およびその配置図を示す。

記録は全てデータレコーダーに磁気記録した。

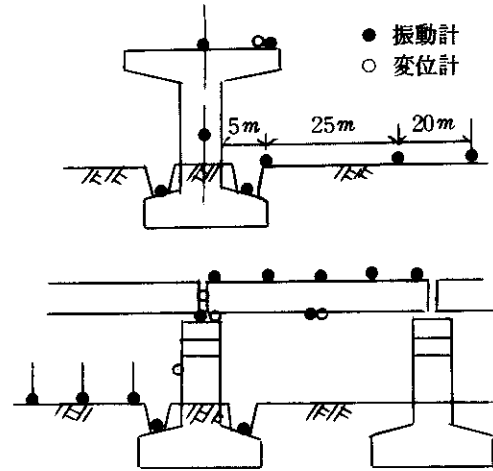


図-7 西大阪線 測定計器配置図

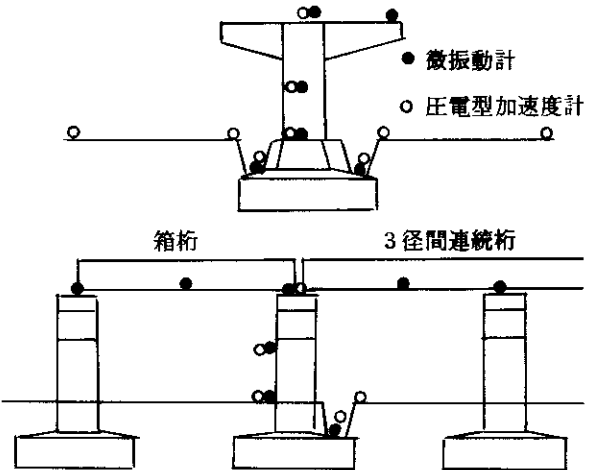


図-8 大阪西宮線 測定計器配置図

表-3 測定項目および測定計器の配置

実験	測定項目	測定計器の配置						測定計器
		西P-79 (西大阪線)			大P-25 (大阪西宮線)			
		上部工	下部工	地盤	上部工	下部工	地盤	
自由振動実験	振動変位	主桁スパン中央	天端・柱・フーチング	近傍・周辺	主桁スパン中央	天端・柱中央・下端・フーチング	—	微振動計
	振動加速度	—	同上	同上	—	同上	近傍・周辺	サーボ型加速度計 圧電型
	静的変位	主桁間	天端	—	—	—	—	ダイヤルゲージ
強制振動実験	振動変位	主桁スパン中央	天端・柱・フーチング	近傍・周辺	主桁スパン中央	天端・柱中央・下端・フーチング	—	微振動計
	振動加速度	—	同上	同上	—	同上	近傍・周辺	サーボ型加速度計 圧電型
	振動変位	—	天端・柱・フーチング	近傍	主桁スパン中央	天端・柱中央・下端・フーチング	—	微振動計
車両走行実験	振動加速度	床版上	同上	近傍・周辺	—	同上	近傍・周辺	サーボ型加速度計 圧電型
	静的変位	主桁スパン中央	梁先端	—	—	—	—	ダイヤルゲージ
	パネ上・パネ下加速度	パネ上：シャーシ部、パネ下：後輪車輪部						圧電型加速度計

### 1-4 その他の調査

橋脚振動実験に付随して、暗振動および試験車のパネ上、パネ下振動特性を調査した。

試験車両のパネ上、パネ下振動の測定は、車両自身の振動と構造物の振動の相関を明らかにするために実施したものである。この測定においてピックアップを図-9に示すように、パネ上は車体

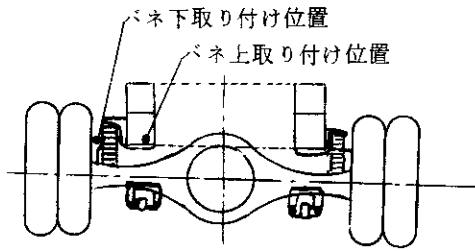
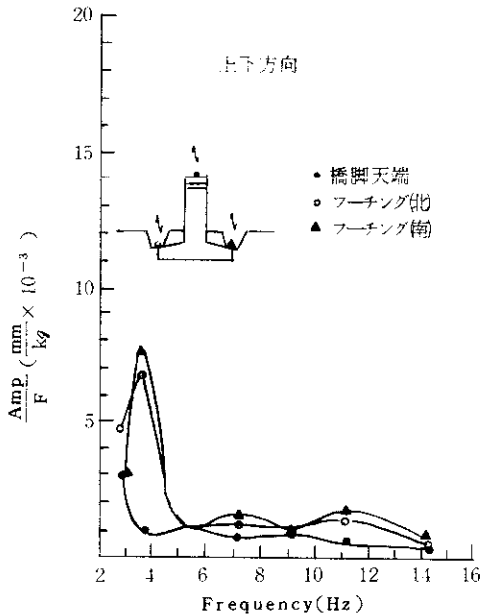


図-9 試験車のパネ上・パネ下固有振動数測定計器取り付け位置

フレームに、パネ下は後輪後軸車軸の車両パネ固定金具に取り付け、上下動の測定を行った。

また、西大阪線では、地盤の動特性を知るため、P S波探査を行った。



## 2. 実験結果および考察

### 2-1 固有振動数および減衰定数

固有振動数および減衰定数は、自由振動実験と車両走行実験の自由減衰振動波形および強制振動実験の共振曲線から算出した。図-10 および図-11はその一例である。

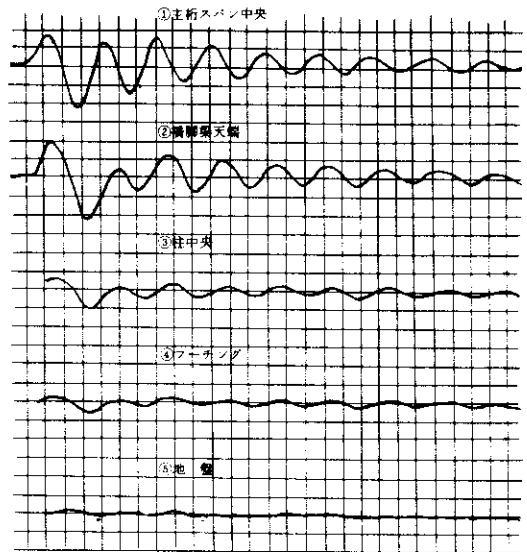


図-10 自由減衰振動変位波形の代表例 (西大阪線)

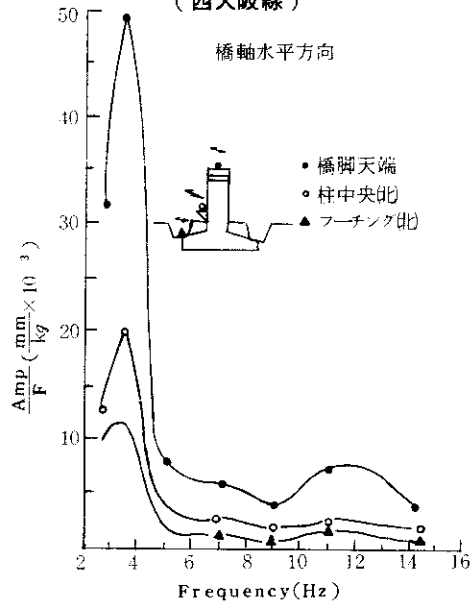


図-11 共振曲線の代表例 (西大阪線)

表一 4 自由振動実験結果一覽

測 点	西 大 阪 線		大 阪 西 宮 線			
			上 部 工 架 設 前		上 部 工 架 設 後	
	固有振動数	減衰定数	固有振動数	減衰定数	固有振動数	減衰定数
①主桁スパン中央	3.38 Hz	0.040	—	—	(箱桁)1.8Hz (I桁)2.9Hz	0.007 0.006
②橋脚天端	3.48 Hz	0.034	5.9 Hz	0.1~0.2	2.7Hz	0.1 前後
③橋脚柱中央	3.49 Hz	0.033	5.9 Hz	0.1~0.2	2.7Hz	0.1 前後
④フーチング	3.44 Hz	0.034	5.9 Hz	0.1~0.2	2.7Hz	0.1 前後
⑤近傍地盤	3.54 Hz	0.023	5.9 Hz	0.1~0.2	2.7Hz	0.1 前後

① 主桁スパン中央のみ上下動の結果であり、他の測点は橋軸方向水平動の結果である。

表一 4 に各測点における自由振動実験から得られた固有振動数および減衰定数を示す。他の実験でもほぼ同様な値となっている。

また上部構造の固有振動数を初等梁理論にて算出した概略値を表一 5 に示す。

表一 5 上部構造の固有振動数の概略計算値

主桁の構造	単純合成桁	単純鋼床版箱	3径間連続鋼床版I桁	
断面2次モーメント( $cm^4$ )	$7.105 \times 10^6$	$2.76 \times 10^7$	$7.49 \times 10^6$	
単位長さ当り質量( $\frac{kg \cdot sec^2}{cm}$ )	0.0186	0.0564	0.024	
支 間 (cm)	3290	5914	3750	
計算値	固有1次振動数	4.11 Hz	1.44 Hz	2.86 Hz
	固有2次振動数	16.44 Hz	5.76 Hz	3.65 Hz

西大阪線の場合、固有振動数は全て3.4 Hz前後の値となっており、減衰定数は0.04程度となっているが、これはいずれも上部工-下部工-地盤を含めた振動系全体の値と考えられる。しかし、3.4 Hzという振動成分は上部工の固有一次振動数に近く、橋脚自体の減衰定数はもっと大きな値(一般的に $h=0.1$ 以上程度)であることを考慮すると主桁の振動が系全体の振動に大きく影響を及ぼしているものと考えられる。

大阪西宮線における上部工架設前後の値をみると、橋脚の固有振動数は、上部工の影響を受けて

系全体の固有振動数に移行している傾向がある。

## 2-2 振動モード

振動変位波形からある時間間隔毎に、各測点の移動状況を追跡して、振動モード図を描いた。

図一 12は西大阪線の自由振動実験における西P-78および西P-79の橋脚天端水平動と、主桁スパン中央上下動の関係を示したものである。橋脚の振動は、橋脚自体の固有一次振動ではなく、主桁の曲げ一次振動の影響を強く受けていることがわかる。

すなわち、ワイヤー切断後、橋脚の振動と同時に主桁の曲げ振動が発生し、この主桁の振動が橋脚に水平力として働き、橋脚の振動はなかなか減衰しない状況となっている。

図一 13は大阪西宮線の車両走行実験における大P-25橋脚と、前後の桁中央部の振動変位状況を示したものである。この結果によると、試験車がI桁部通過時に箱桁は振動せず、橋脚の振動量も小さい。ところが橋脚部通過時には箱桁も振動を始め、橋脚の振動量も増加し、橋軸直角方向のロッキングとスウェイの連成した振動が大きくなる。箱桁部通過時には箱桁の振動量が大きくなり、その影響でI桁も振動する。試験車通過後は自由減衰振動となり、各部の振動量が徐々に減衰する。全体的には、橋脚上の両側に架設され

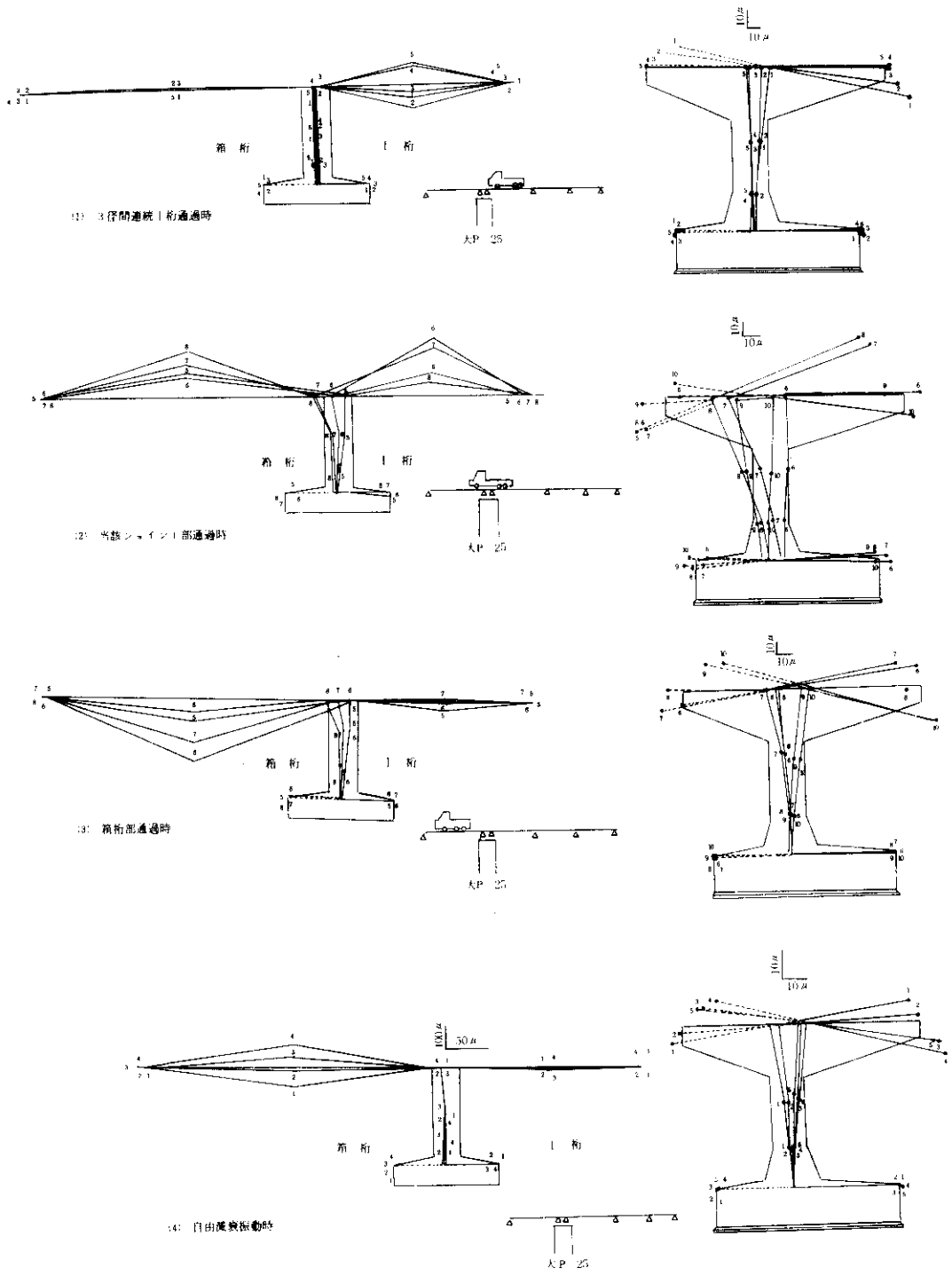


図-13 大阪西宮線試験車走行時の振動性状図

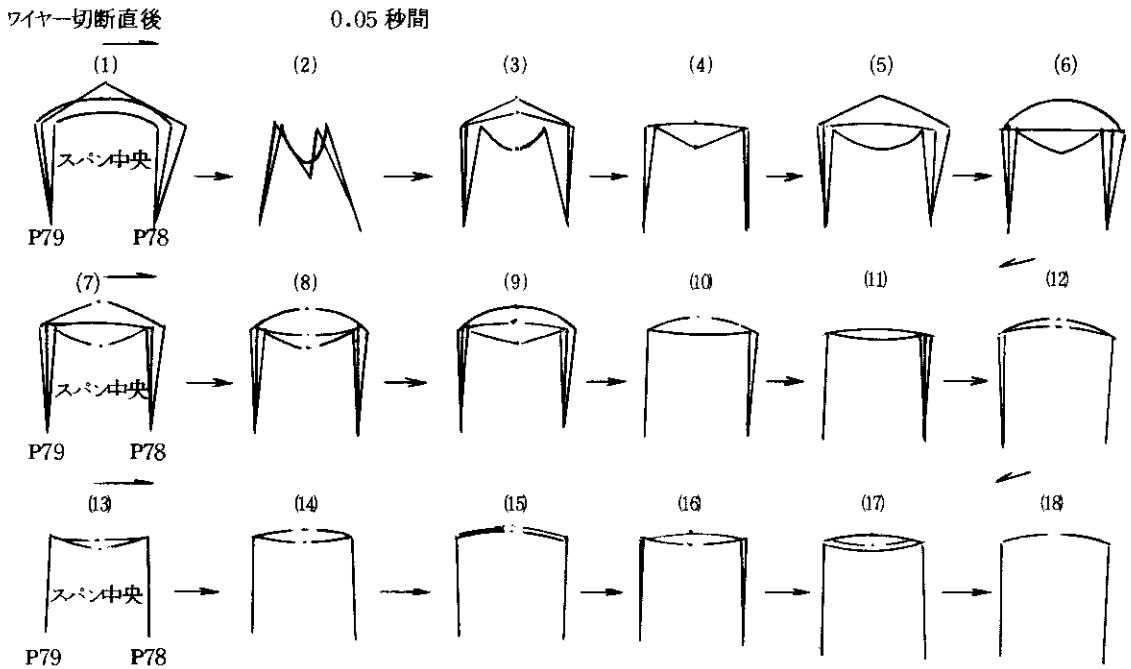


図-12 西大阪線 P79, P78 橋脚天端および主桁中央部振動モード図  
(自由振動実験)

ている上部工の固有一次振動数（上部構造のスパン、剛性、重量等）が異なる橋脚ほど、橋軸方向の振動減衰が大きくなる傾向を示している。しかし、隣り合う上部構造の固有振動数がどの程度違えばこのような現象を生ずるかは不明であり、今

後の研究が待たれる。

### 2-3 振動伝播特性

図-14 は、西大阪線の車両走行実験における、上下動振動成分の振動伝播特性を示したものであ

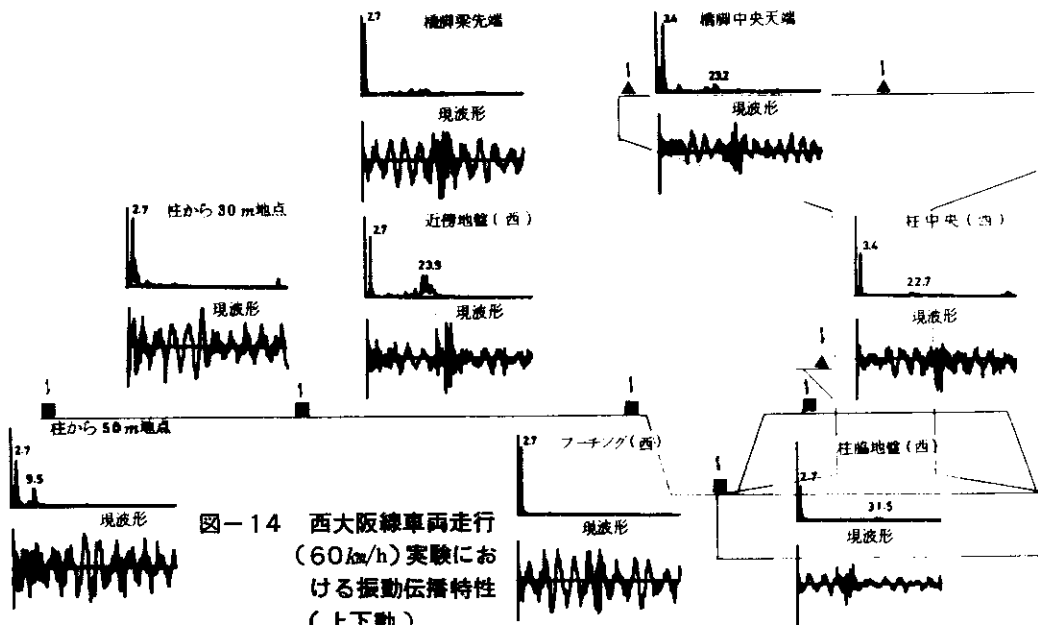


図-14 西大阪線車両走行 (60km/h) 実験における振動伝播特性 (上下動)



る。各測点における振動パワースペクトル分析を行い、その性状を調査した。この結果、3 Hz前後の長周期の振動は、50 m地点まで確実に伝播しているが、ジョイント部通過時に発生すると考えら

れる20 Hz以上の振動は、橋脚から5 mの近傍地盤には伝播するが、それより以遠には伝播していない。

また、図-15は、パワースペクトルの時間変

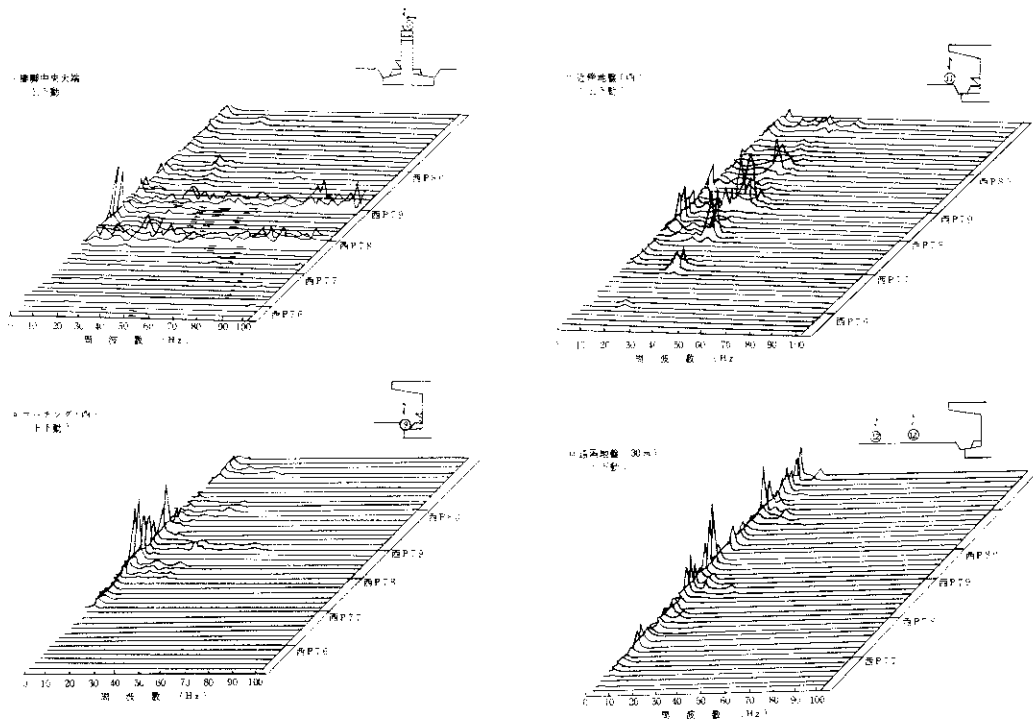


図-15 西大阪線車両走行実験時のランニングスペクトル

化を示した振動加速度のランニングスペクトルである。試験車が西P-76から西P-80に向かって走行する際の各測点の振動特性を示している。

橋脚中央天端の上下動の性状を見ると、試験車がジョイント部通過時に20 Hzおよび80 Hz付近の周波数成分が卓越している。これに対して、試験車がスパン中央部通過時には3.5 Hz前後の振動が卓越していることがよくわかる。

また、フーチング上では、3.5 Hzおよび20 Hz付近の振動成分は伝播しているが、それ以上の周波数成分は伝播していない。

近傍地盤においては、フーチング上と同様に3.5 Hzおよび20 Hz付近の振動が卓越しているが、特に、20 Hz付近の周波数成分が優勢となっている。

周辺地盤においては、3.5 Hz前後の周波数成分のみ伝播しており、当該橋脚以外からの振動波も伝播している状況がわかる。

一方大阪西宮線の車両走行実験の結果から、フーチング～近傍地盤、近傍地盤～官民境界への伝達関数を求めると、図-16に示すとおりである。

これによると、構造物(フーチング)から地盤への伝播時に、10～20 Hzの周波数成分が増幅している。暗振動の測定結果によると、地盤の卓越振動数は3～5 Hz、および10～16 Hz付近であり、地盤に起因しているものと考えられる。

しかし、近傍地盤から周辺地盤への伝播時には、3～4 Hzの周波数成分が主体となり、高い周波数成分は伝播していない。

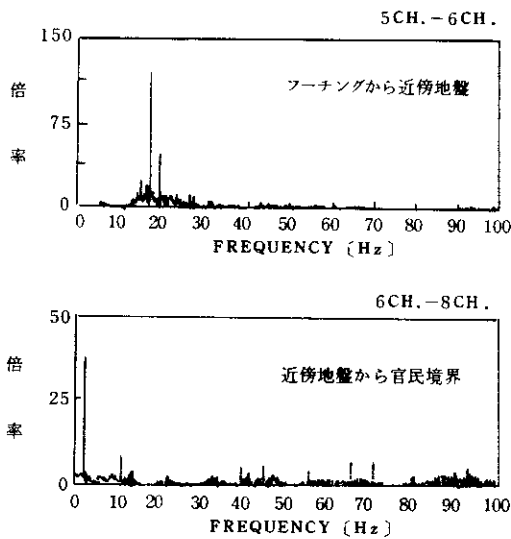


図-16 フーチングから地盤への伝達関数  
(大阪西宮線車両走行実験)

#### 2-4 距離減衰特性

西大阪線の車両走行実験結果より、距離減衰特性を調査した。

橋軸直角方向測線の測定結果を用いて、橋脚直下地盤、フーチング上、橋脚から5m、30m、50mの各地点の、試験車走行時の振動レベルより距離減衰曲線を求めた。

図-17は、走行条件別の上下動成分の距離減衰

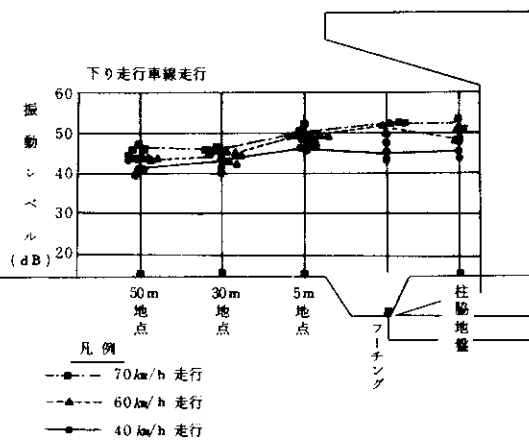


図-17 距離減衰曲線(上下動)

曲線であり、図-18は、同様に橋軸直角方向水平動の距離減衰曲線である。

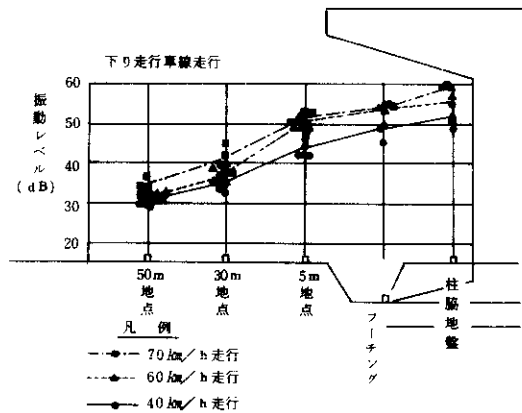


図-18 距離減衰曲線(橋軸直角水平動)

上下動の距離減衰は、5m地点まではほとんど減衰はないが、5m地点以遠で急激に減衰している。平均して1.5dB/倍距離程度の減衰となっている。これに対し、橋軸直角方向水平動の距離減衰は、5m地点ですでに7dB程度減衰しており、平均して4~5dB/倍距離の減衰となっている。しかし、振動レベルとしては、橋脚近傍において上下動よりむしろ大きな値となっており、何らかの要因が介在するものと考えられる。この点については今後検討を必要とする。

次に、図-19は各測点の上下動の1/3オクターブ分析結果からえられた代表的な周波数成分(中心周波数3.15Hz、12.5Hz、25Hz、80Hz)バンドレベル別の距離減衰曲線を描いたものである。

この周波数別距離減衰曲線からも、中心周波数3.15Hzの振動成分は、橋脚直下から50mの地点までほとんど減衰していない。しかし、中心周波数12.5Hzの成分の場合には、この地点で約10dB減衰し、中心周波数25Hzの場合には約15dB、中心周波数80Hzの場合には約25dBと、周波数が高くなるにつれ大きく減衰している。また、中心周波数25Hzの成分が5m地点で増幅さ

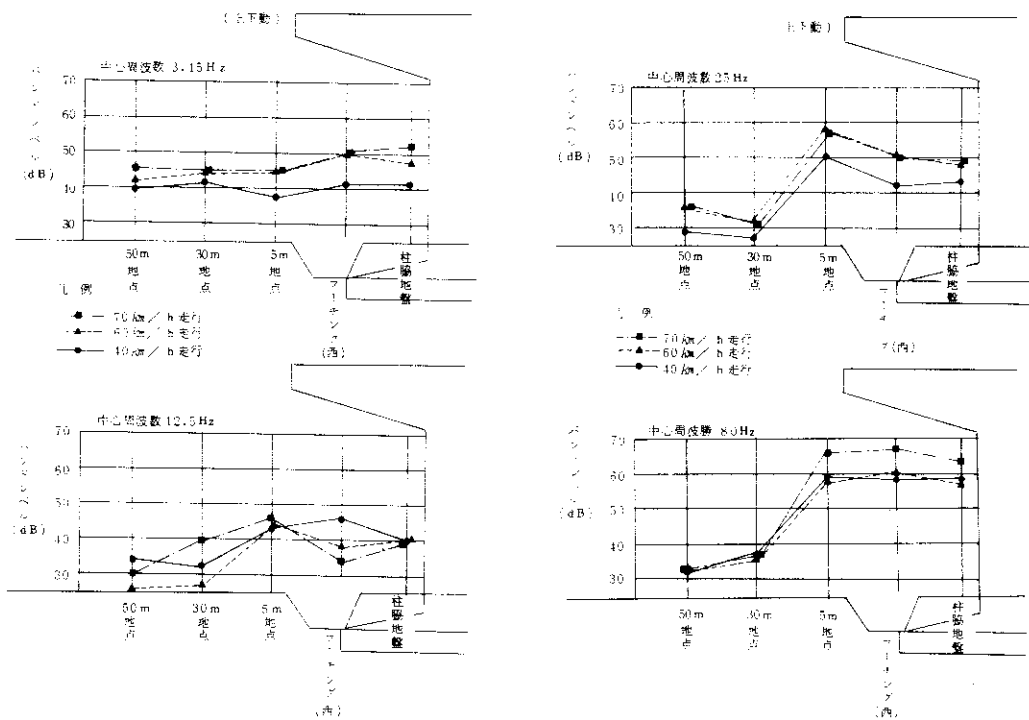


図-19 周波数別距離減衰曲線(上下動)

れる傾向がみられるが、この原因が地盤によるものか、構造物からの影響によるものか、明確でない。

2-5 試験車のバネ上、およびバネ下振動  
試験車走行時のバネ上、バネ下振動の原波形(加速度波形)の代表例(西大阪線、40 Km/h、下り走行車線走行)を図-20に示す。

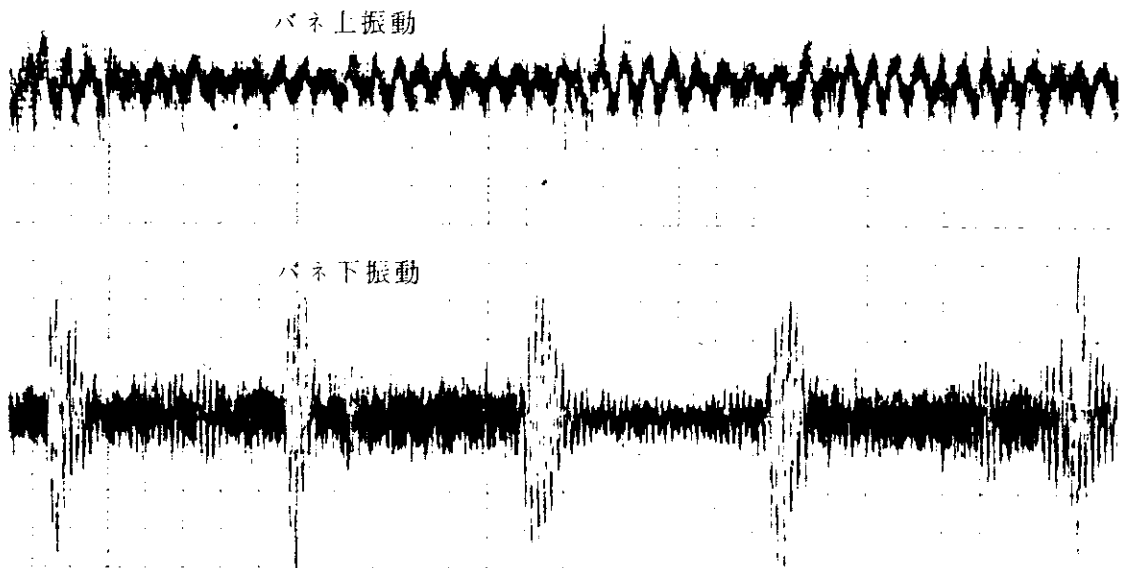


図-20 バネ上、バネ下振動の原波形(西大阪線)

このバネ上、バネ下振動の加速度波形を用いて、ランニングスペクトル分析し、周波数特性の変化

を考察した。その一例（大阪西宮線、60 km/h、下り追越車線走行）を図-21に示す。

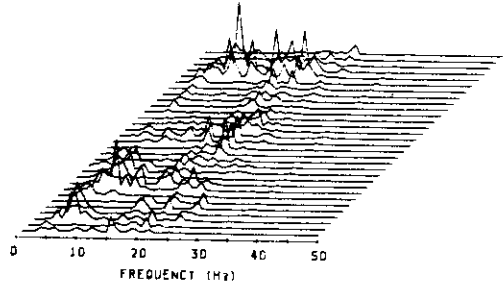
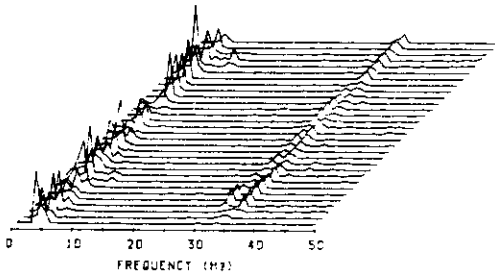


図-21 バネ上、バネ下振動のランニングスペクトル分析結果（大阪西宮線）

また、高架橋との連成を避けるため、平面街路上で試験車を走行させて、同様にバネ上、バネ下振動を測定し、パワースペクトル分析を行った。その結果を図-22に示す。

これらの結果から、総重量20t前後の大型トラックの60 km/h走行時のバネ上、バネ下の固有振動数は、それぞれ3~4 Hz、12~15 Hz程度に分布しているものと考えられる。

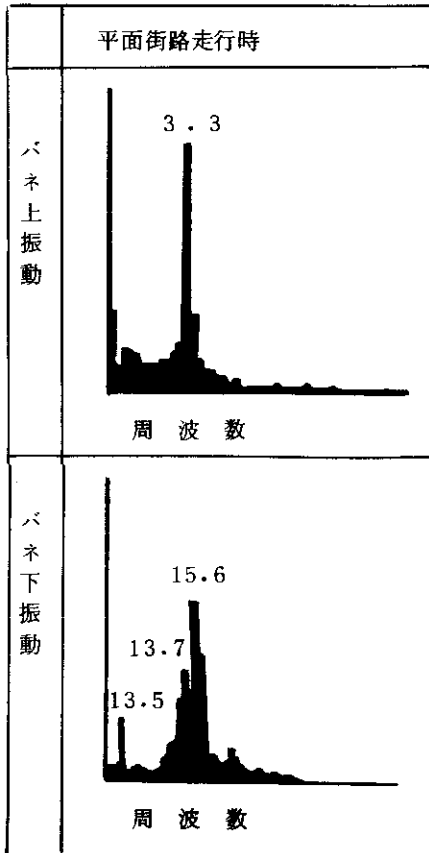


図-22 バネ上・バネ下振動のパワースペクトル分析結果（平面街路）

### 3. まとめ

この実験で得られた成果をまとめると以下のとおりである。

(1) 都市内の高架橋に多用されている、スパン30 m前後の単純合成桁、RC単柱橋脚形式の地盤を含めた系の固有振動数は、3.5 Hz前後であり、上部工の曲げ一次振動数に一致する傾向にある。

また、橋脚の自由振動実験の振動モードから、上部工が強制力となって橋脚を振動させていることが判明した。

上部工架設前後の橋脚の振動実験からも、上部工の影響は、予想以上に大きい結果となった。

(2) 車両走行実験結果によると、ジョイント通過時には20 Hzおよび80 Hz前後の周波数成分が卓越する振動が発生し、スパン中央部通過時には3~4 Hzの周波数成分が卓越する振動が発生した。

(3) 橋脚からフーチングを介して近傍地盤への伝播性は、ジョイント通過時に発生すると考えられる20 Hz以上の周波数成分は、橋脚近傍までは伝播するが、それ以遠には、3~4 Hz前後の上部工の曲げ一次振動に起因する周波数成分のみが伝播する傾向を示す。

- (4) 総重量 20 t 前後の大型トラックの 60km/h 走行時のバネ上振動の固有振動数は 3 ~ 4Hz 程度であり、地盤の卓越振動数 ( 3 ~ 5 Hz ) に近接している。このため高架橋全体の振動系の固有振動数が 3 Hz 前後となる場合には、大型車両等の走行時に、路面の不陸により発生した車両のバネ上振動が上部工と連成振動を起こして、橋脚から地盤へと伝播するものと考えられる。
- (5) 固有振動数の異なる上部構造が隣り合う場合は、橋脚の橋軸方向の振動に対して制振効果を生み出す可能性がある。しかしながら、定量的なことは不明であり、今後十分に検討する必要がある。

今後、構造物 ( 上部工から基礎までを含めた構造系 ) および地盤を含めた一体的なモデル化を設定し、高架橋の振動性状を把握することも必要であり、より効果的な防振対策を立案するためには、さらに、多くのデータの蓄積が必要であると考えらる。

## あとがき

この実験は、大阪第二建設部の協力を得て大阪管理部が実施したものである。末筆ながら実験の計画、実施、解析等にあって御指導を賜った立命館大学畠山教授ほか関係者各位に深く感謝の意を表します。

## ( 参考文献 )

- 1) 西大阪線橋脚振動実験業務報告書：阪神高速道路公団大阪管理部、昭和 55 年 11 月
- 2) 単柱橋脚振動実験解析業務報告書：阪神高速道路公団大阪管理部、昭和 56 年 9 月
- 3) 大阪西宮線供用前後の騒音振動測定業務その 1：阪神高速道路公団大阪第二建設部、昭和 56 年 9 月