

3. 分析結果と考察

騒音・振動測定の実験結果とその考察については、各測定対象橋梁ごとに行うことにする。

(1) 葉鹿橋 A

a) 8 mmビデオ解析による通過交通分析 (葉鹿橋 A2のみ)

葉鹿橋 A1, A2の測定の際の通過交通の概要は、表-3に示す。また、葉鹿橋 A2 の8 mmビデオ解析による普通車の方向別速度分布を図-8に示す。

表-3 葉鹿橋 Aの通過交通の概要

	葉鹿橋 A1			葉鹿橋 A2		
	足利→太田	太田→足利	両方向	足利→太田	太田→足利	両方向
大型車	8	9	17	11	11	22
普通車	59	50	109	91	60	151
その他	1	7	8	2	2	4
合計	68	66	134	104	73	177

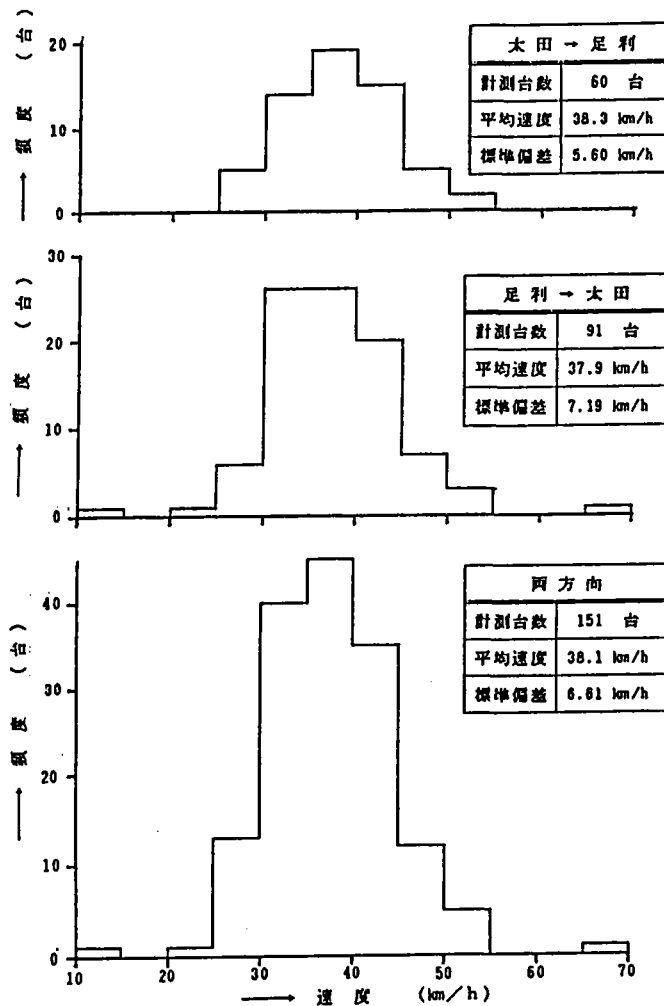


図-8 普通車の方向別速度分布

b) 騒音・振動加速度レベルの1/3オクターブ周波数分析

橋梁の騒音や振動は、通過車両の進行方向・車種・速度によって変化することが考えられる。そこで、まず、進行方向別に比較を行ったが、すべての測点で違いはほとんど見られなかった。つぎに、車種別に比較を行ったが、「普通車」と「大型車」については、スペクトルの形自体はほとんど変わりなく、レベルの違いだけであった。「その他」については、多少異なったスペクトルの形を示したが、これは、通過台数がかなり少なく、自転車等も含まれているためであると考えられる。さらに、測定台数の多い「普通車」について図-9～12に示すように速度別の比較を行ったが、高周波領域で若干違うものの、その影響は大きくはなかった。

以上のことから、橋梁の騒音や振動は、車両の進行方向・車種・速度によって分けることなく、通過する全ての車両を対象としてパワー平均したもので、改修前後の周波数分析の比較を行うことにした。

図-13に路面改修前後の騒音・振動加速度の分析結果を示す。

これより、次のようなことがわかった。

- ①騒音は、オーバーオール値だけを見ても分かるように、路面改修工事後には全ての測点で5dB～7dBの低減が見られる。また、振動加速度も、同様に15dB程度の低減が見られる。振動加速度に比べて騒音の低減効果が小さいのは、振動加速度の測点が鋼桁のみであり、それ以外の部材の振動による騒音や車両の走行音の影響が大きいためと考えられる。
- ②騒音や振動加速度のスペクトルの形は、改修前後でほぼ同じ形であるが、路面改修によって、8Hz～20Hz付近の周波数領域で、そのレベルの低下が著しい。このことは、8Hz～20Hzの周波数領域の騒音や振動は、路面の凹凸に起因するものであったためと考えられる。また、4Hzのピークは葉鹿橋の曲げ振動の固有一次振動数に一致しているため、レベルが余り低下しなかったと考えられる。さらに、315Hz付近で改修前よりレベルが増加しているのは、アスファルトをコンクリート路面に直接オーバーレイしたため、足利側支承部のジョイントの段差が改修前より拡大し、車両通過の衝撃音が大きくなったことによると考えられる。

これらのことから、路面の凹凸は、橋梁の騒音や振動に大きな影響をもち、それを是正する路面改修工事は、かなりの騒音・振動低減効果をもつことがわかった。したがって、橋梁管理者は、路面のメンテナンスを日頃より十分に行う必要があると考えられる。

c) FFTアナライザによる振動加速度の分析

図-2の右側に示したように振動加速度の詳細測定を行い、FFTアナライザで分析を行った。

図-13～16に振動加速度の生波形（サンプリングの周波数100Hz、個数1024個）の代表例を示す。

なお、図-13、14は、車両の進行方向が足利→太田方向のものであり、図-15、16は、反対に太田→足利方向のものである。また、図-13、15は、スパン中央断面の橋軸直角方向のRC床版と鋼桁の振動加速度をみたものであり、図-14、16は、断面中央の橋軸方向をみたものである。さらに、各図は、それぞれ1台の車両によって生じた振動加速度を表しており、すべてが同一の車両のものではないことを断っておく。

これらの分析から、RC床版と鋼桁の振動は、低周波領域で一致せず、RC床版と鋼桁の十分な結合が得られていないのではと考えられる。また、上流側と下流側の低周波振動が逆位相になっており、橋軸直角方向の“ねじれ振動”が発生しているのではないかと考えられる。

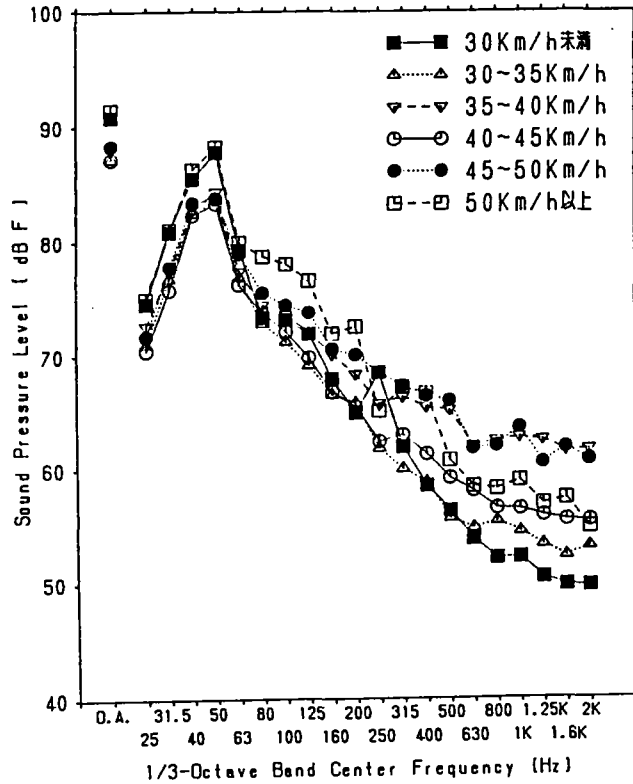


図-9 葉鹿橋 A2・足利側支承部騒音の速度別周波数分析結果

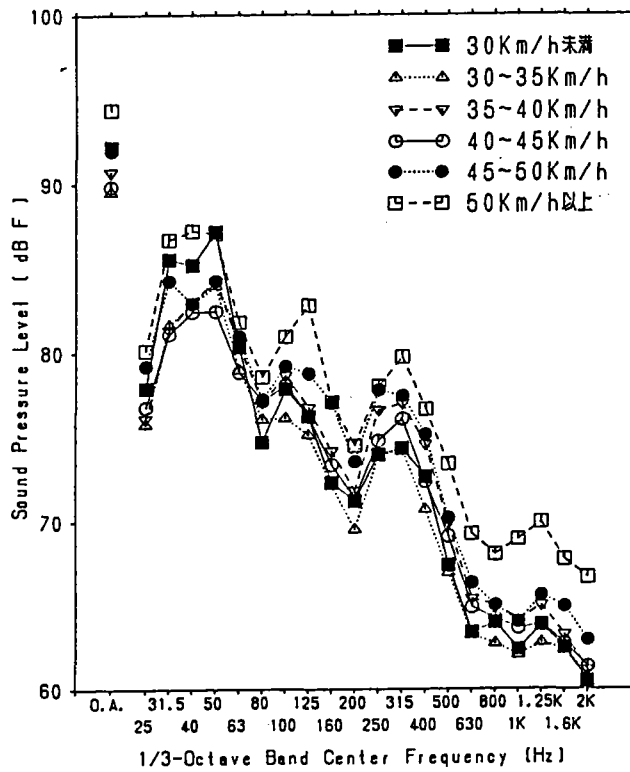


図-10 葉鹿橋 A2・太田側支承部騒音の速度別周波数分析結果

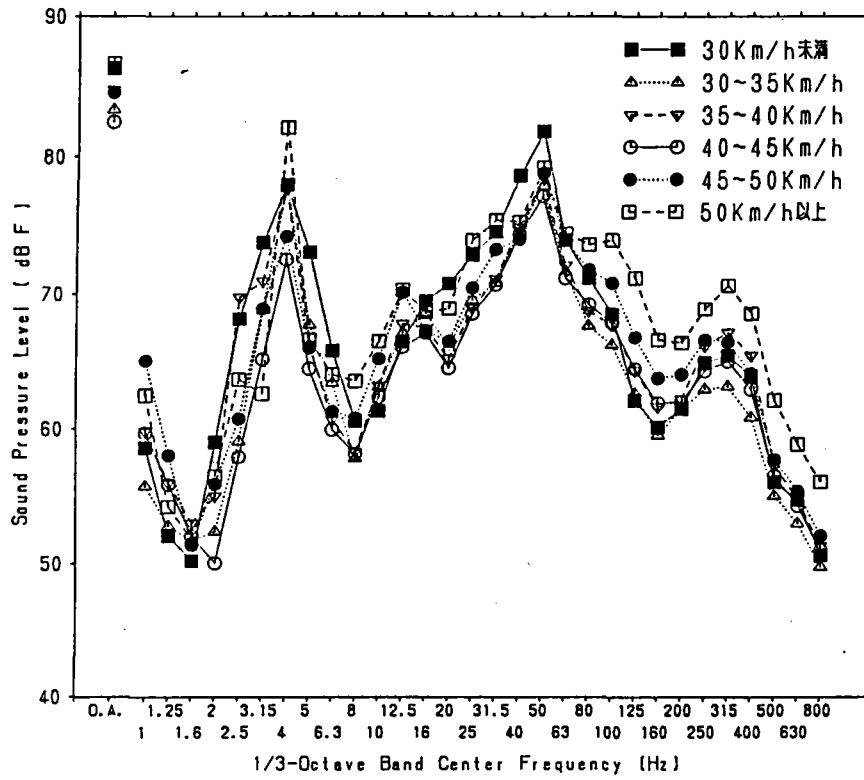


図-1 1 葉鹿橋 A2・床版直下騒音の速度別周波数分析結果

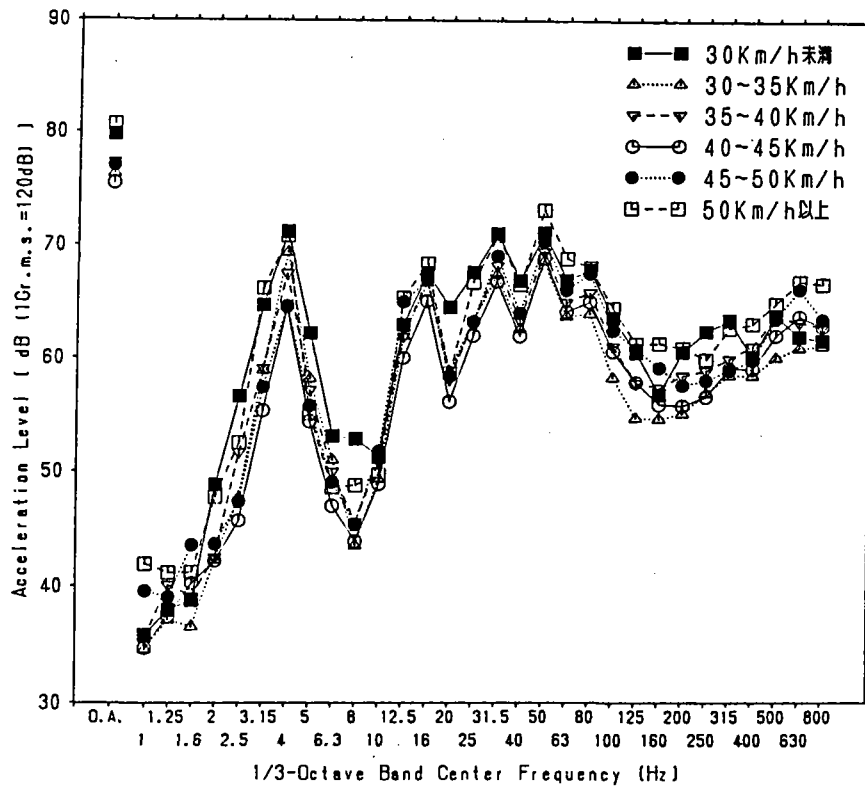


図-1 2 葉鹿橋 A2・振動加速度の速度別周波数分析結果

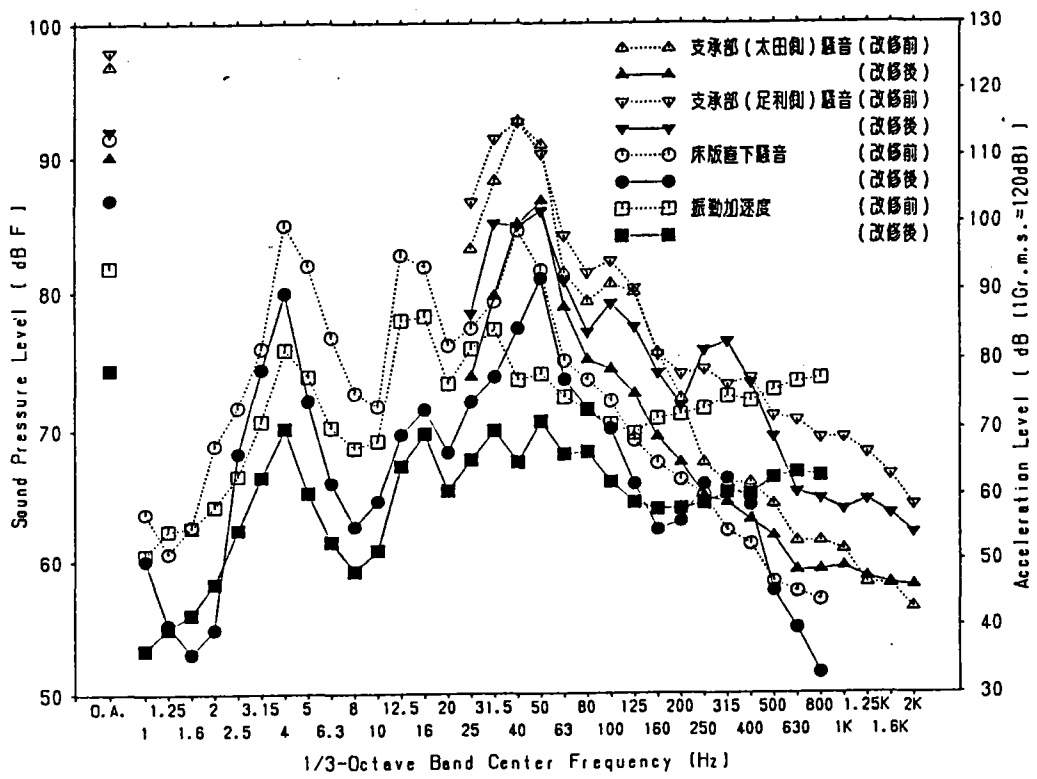


図-13 葉鹿橋A・路面改修前後の騒音・振動加速度の周波数分析結果

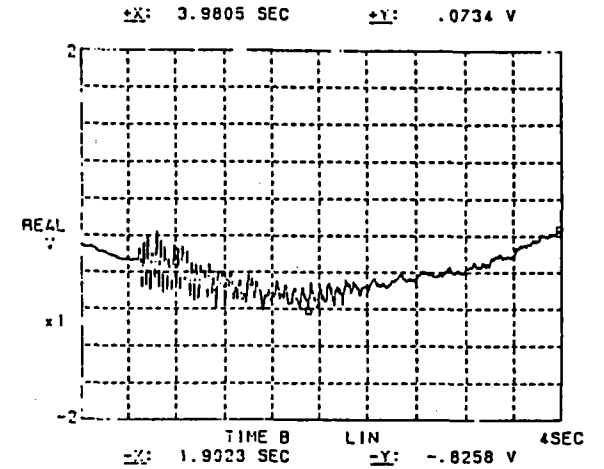
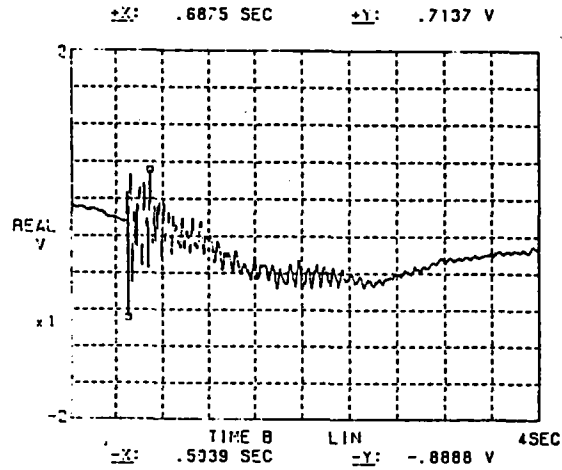
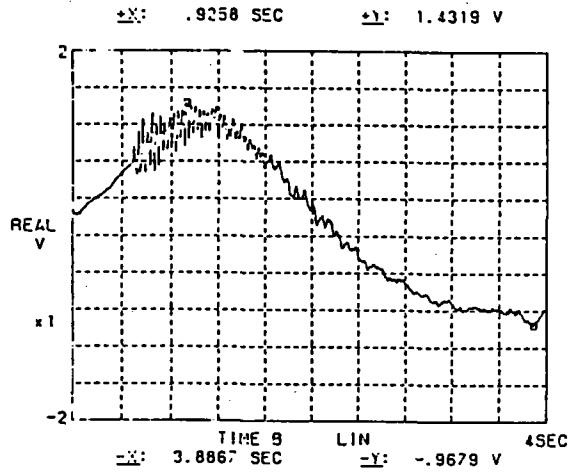
設置方向：橋軸直角方向 方向：足利→太田

上流側

断面中央

下流側

コンクリート床版



鋼主桁

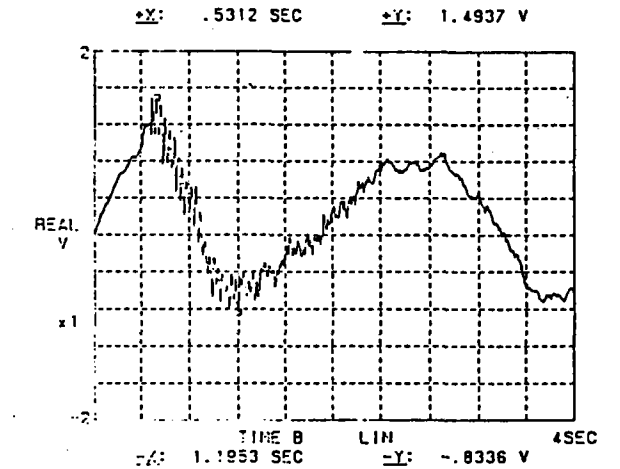
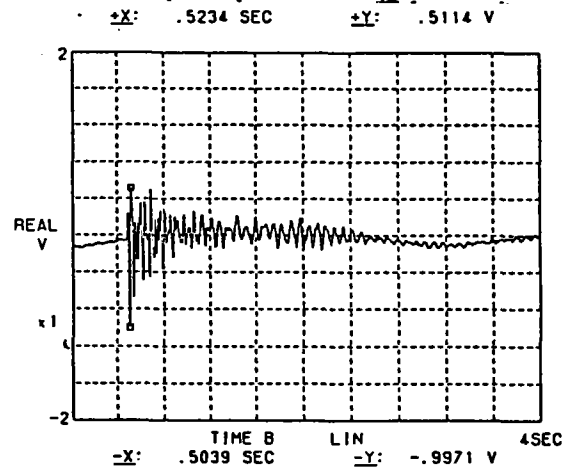
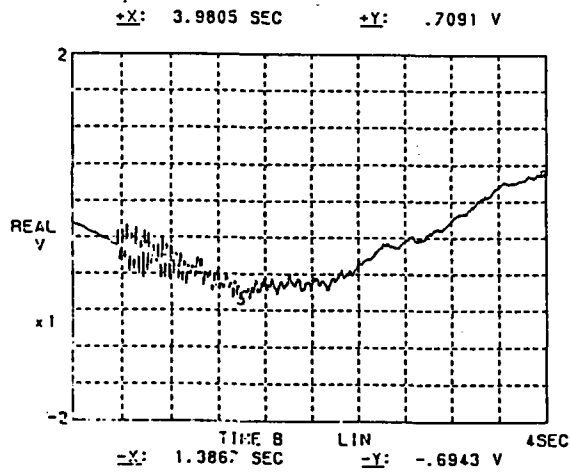


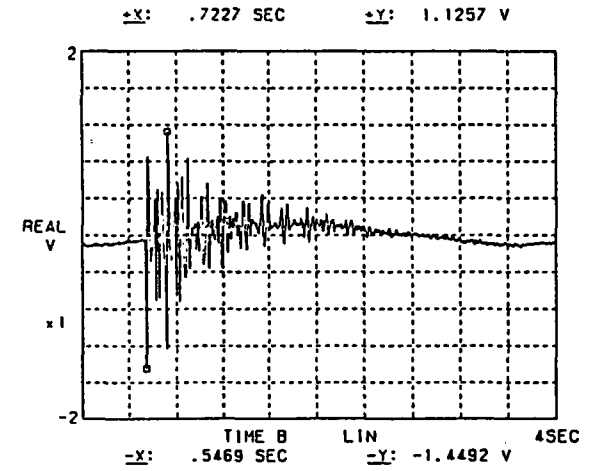
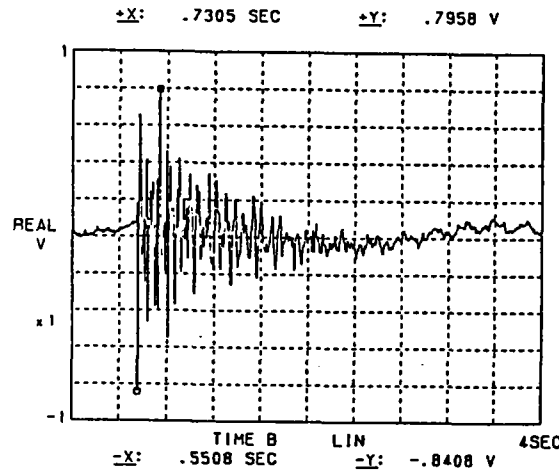
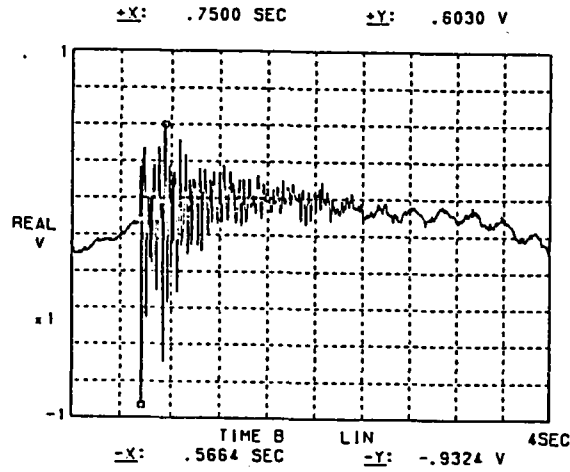
図-13 振動加速度の生波形の比較 (1)

設置方向：橋軸方向 方 向：足利→太田

1 / 4 スパン

1 / 2 スパン
コンクリート床版

支承部



鋼主桁

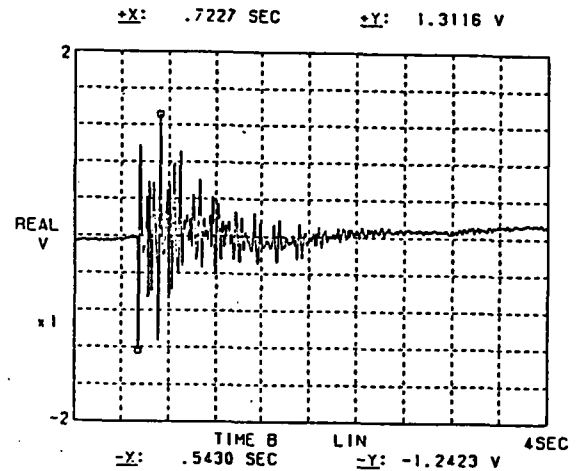
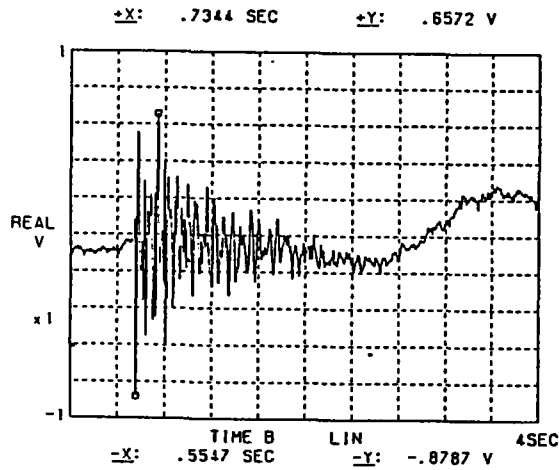
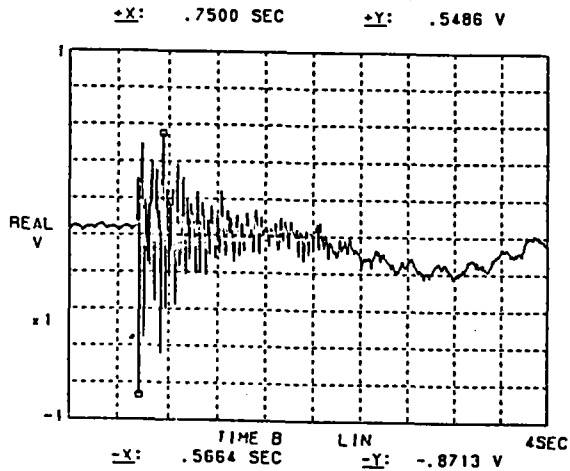


図-14 振動加速度の生波形の比較(2)

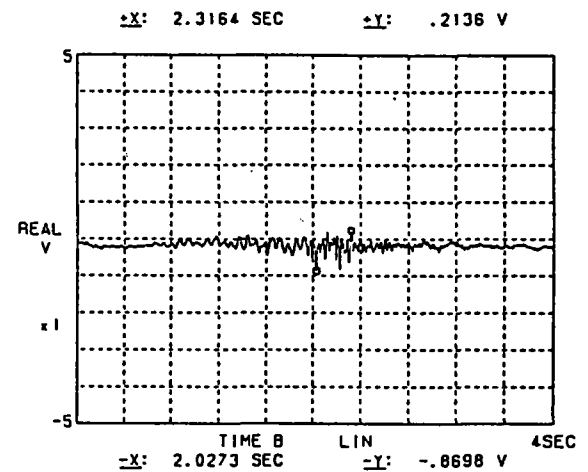
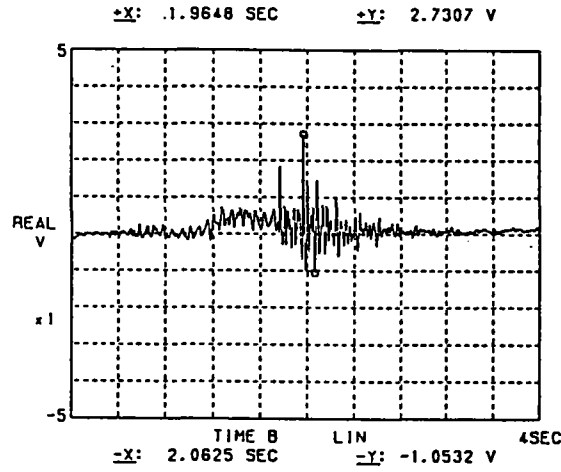
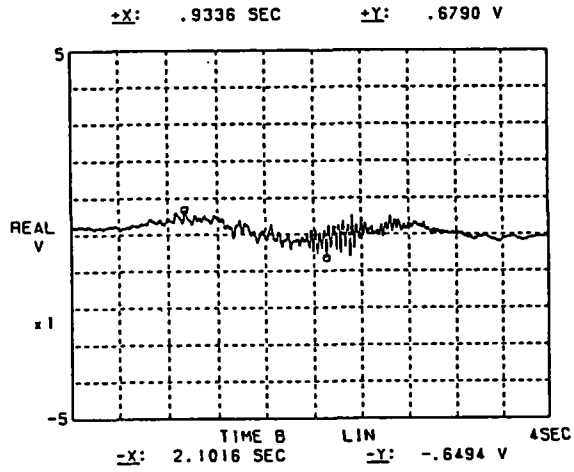
設置方向：橋軸直角方向 方向：太田→足利

上流側

断面中央
コンクリート床版

下流側

-18-



鋼主桁

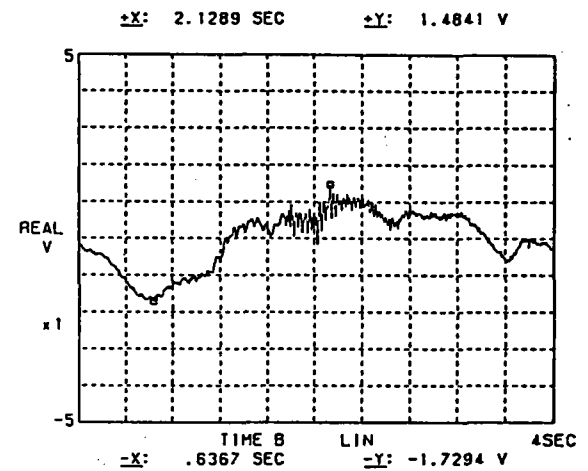
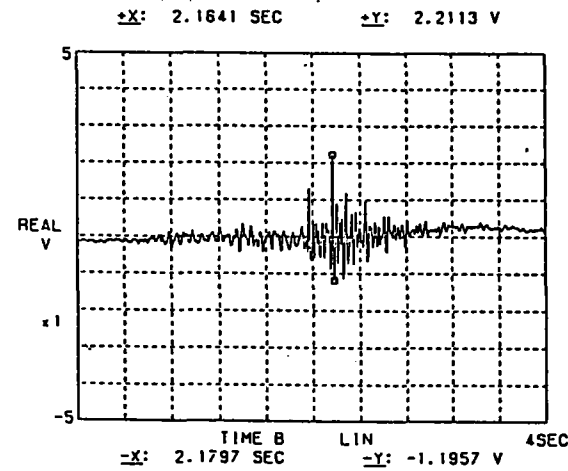
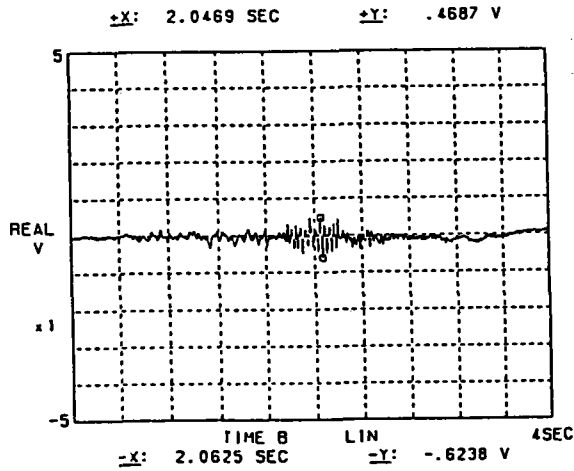


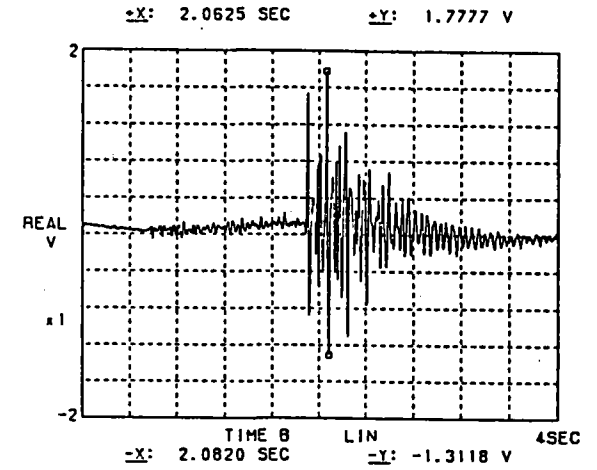
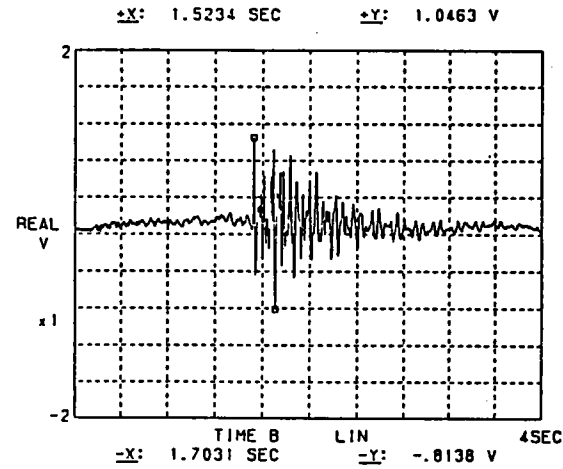
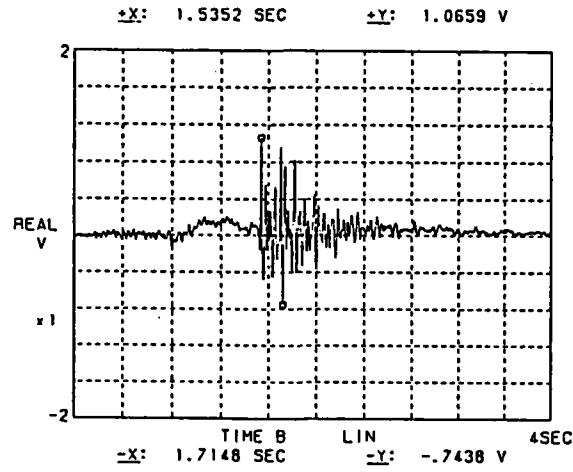
図-15 振動加速度の生波形の比較 (3)

設置方向：橋軸方向 方 向：太田→足利

1 / 4 スパン

1 / 2 スパン
コンクリート床版

支承部



鋼主桁

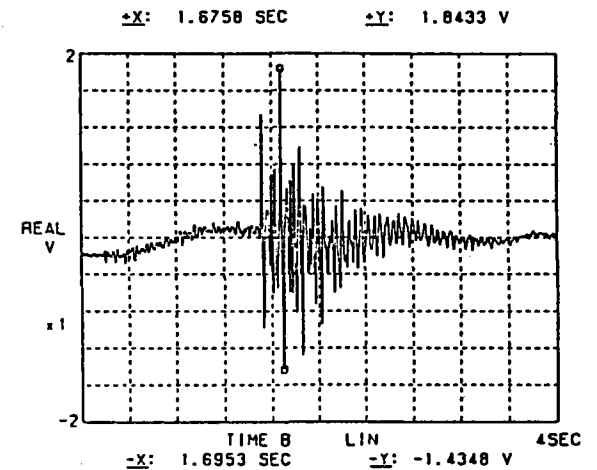
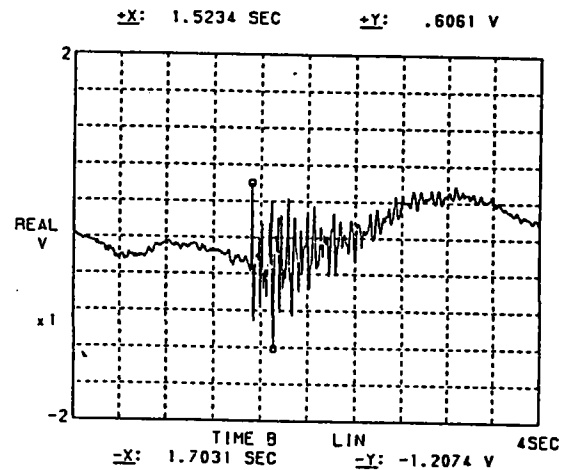
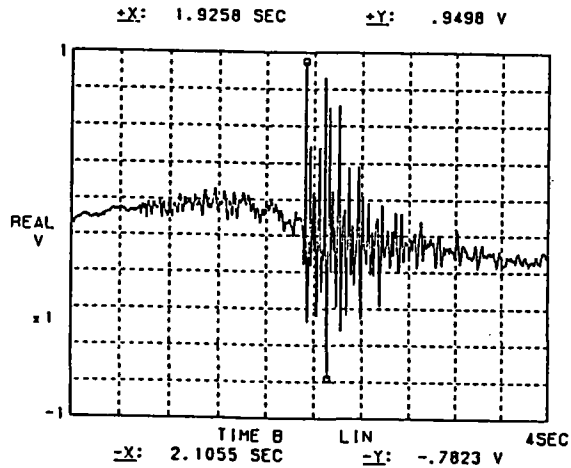


図-16 振動加速度の生波形の比較(4)

(2) 葉鹿橋 B

a) 8mmビデオ解析による通過交通分析

葉鹿橋 B1, B2の測定の際の通過交通の概要は、表-3に示す。また、葉鹿橋 B1, B2の8mmビデオ解析による普通車の方向別速度分布を図-17に示す。

表-4 葉鹿橋 Bの通過交通の概要

	葉鹿橋 B1			葉鹿橋 B2		
	足利→太田	太田→足利	両方向	足利→太田	太田→足利	両方向
大型車	14	5	19	7	4	11
普通車	53	94	147	187	62	249
その他	5	3	8	11	1	12
合計	72	102	174	205	67	272

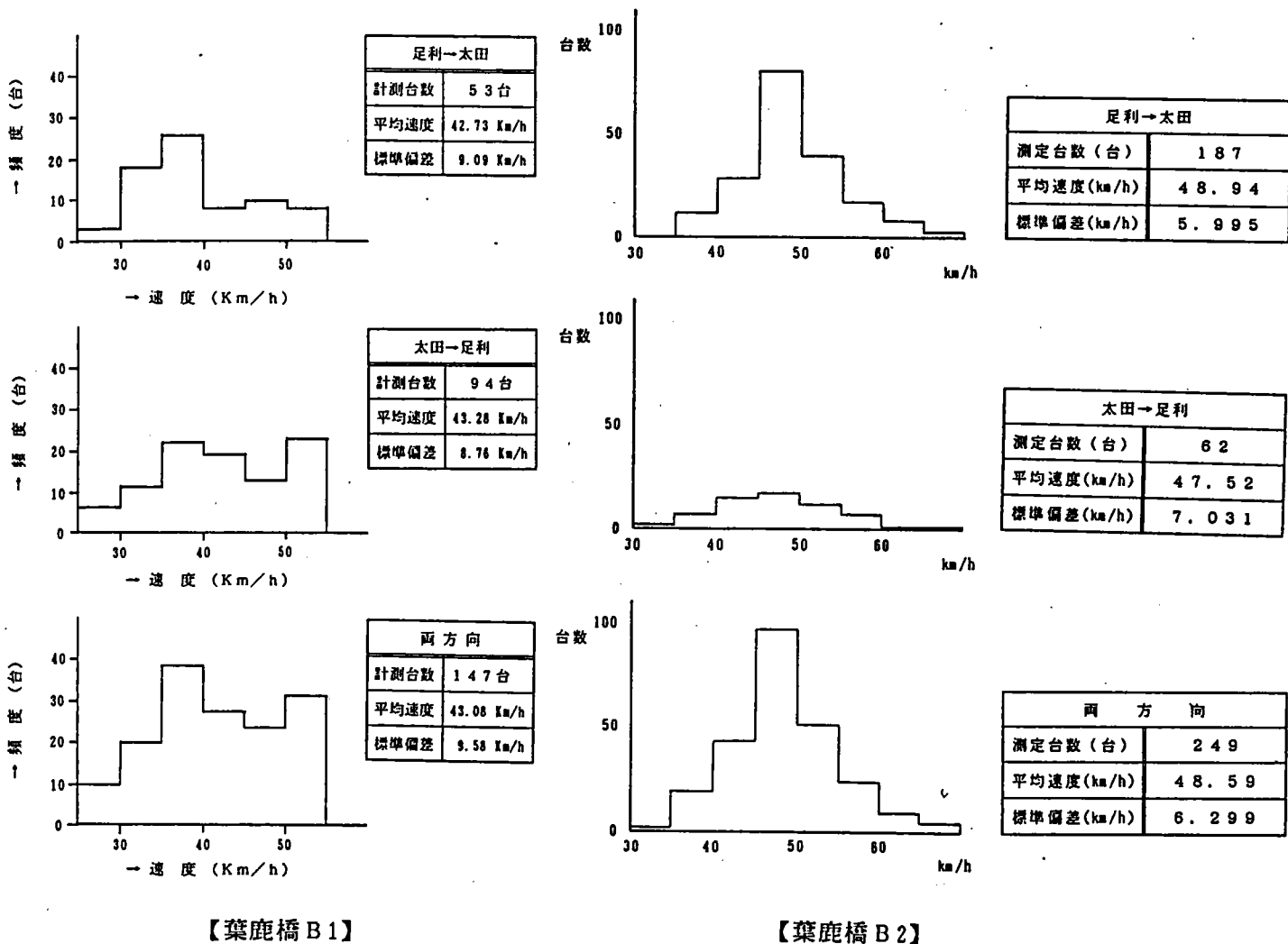


図-17 普通車の方向別速度分布

b) 騒音・振動加速度レベルの1/3オクターブ周波数分析

3つの車種ごとに進行方向別の比較を行ったが、葉鹿橋B1において、太田→足利方向の大型車が逆方向よりもレベルが小さくなる傾向を示したほか、すべての測点で違いはほとんど見られなかった。

次に、進行方向や速度ごとに車種別の比較を行ったが、「普通車」と「大型車」については、スペクトルの形自体はほとんど変わりなく、レベルの違いだけであった。

さらに、図-18～23に示すように「普通車」について速度別の比較を行ったところ、速度が遅い方が騒音や振動のレベルが大きいという以外な結果を得た。これは、鋼合成桁橋では見られないものである。

騒音や振動の代表値として、車両の進行方向・車種・速度によって分けることなく、通過する全ての車両を対象としてパワー平均したものをを用いることにし、葉鹿橋B1、B2の周波数分析結果を表したものを図-24に示す。

このような分析により、葉鹿橋B1の騒音・振動特性として、次のことがわかった。

①騒音は、4 Hz, 10 Hz, 50 Hz付近に卓越周波数をもつ。また、50 Hz以上の周波数領域では、床版直下騒音は、支承部騒音とほぼ一致している。

②振動加速度は、顕著な卓越周波数をもたず、騒音と対応していない。また、スパン中央、1/4スパンではほぼ同様なスペクトルを示し、振動モードとの関係は明らかでない。さらに、支承部の振動加速度は、1 Hz付近で最大となり、橋梁全体が剛体モードで振動している可能性があると考えられる。

③各測点について、進行方向・車種別に分析を行ったが、これらは、ほぼ同じスペクトルを示している。しかし、大型車では、進行方向によって太田→足利の方が逆方向の足利→太田よりもレベルが小さくなる傾向があった。また、普通車について、速度別に分析したところ、速度が遅い方が騒音や振動のレベルが大きいという鋼合成桁橋では見られない以外な結果を得た。

また、葉鹿橋B2の騒音・振動特性として、次のことがわかった。

①床版直下騒音は、2.5 Hz, 8 Hz, 40 Hz付近に卓越周波数を持つが、板桁橋ほど顕著ではない。支承部騒音は、床版直下騒音のスペクトルと100 Hz以上の周波数領域で大きく異なっている。

②スパン中央の振動加速度は、上・下流側ともほとんど一致している。1/4スパンの振動加速度は、スパン中央より全般的に大きい。また、支承部振動加速度も、40 Hz以上の周波数領域ではスパン中央・1/4スパンとほとんど一致している。

③支承部騒音と床版直下騒音が相違することや支承部振動加速度レベルが大きいことの原因は、支承部ジョイントに大きな段差が存在し、それによる衝撃が影響したためと考えられる。

さらに、速度が45 Km/h～50 Km/hの「普通車」について、葉鹿橋B1と葉鹿橋B2の周波数分析結果を比較したものを図-25～27に示す。

これらより、葉鹿橋Bとしての騒音・振動特性を考察すると、次のことがわかった。

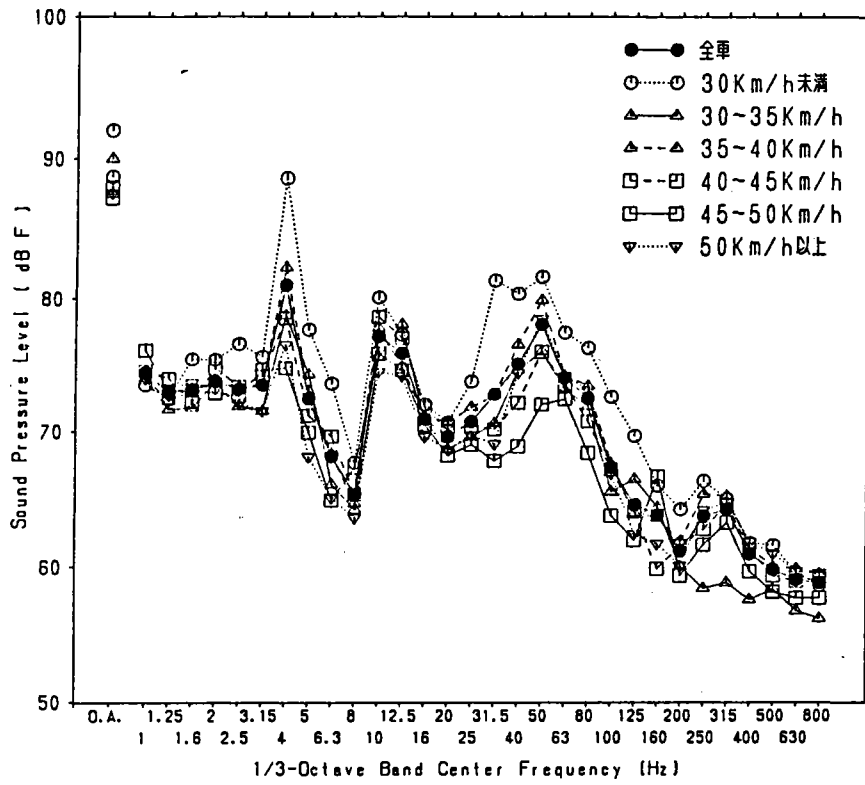
①曲弦ワーレントラス橋の騒音と振動加速度のスペクトルの卓越周波数は、単純板桁橋ほど顕著ではない。

②騒音と振動加速度の卓越周波数は、ほぼ対応するものの、6.3 Hz付近については対応していない。また、1/4スパンの振動加速度は、支間中央より全般的に大きい。これらは、曲弦ワーレントラス橋の複雑な振動モードが影響しているためではないかと考えられる。

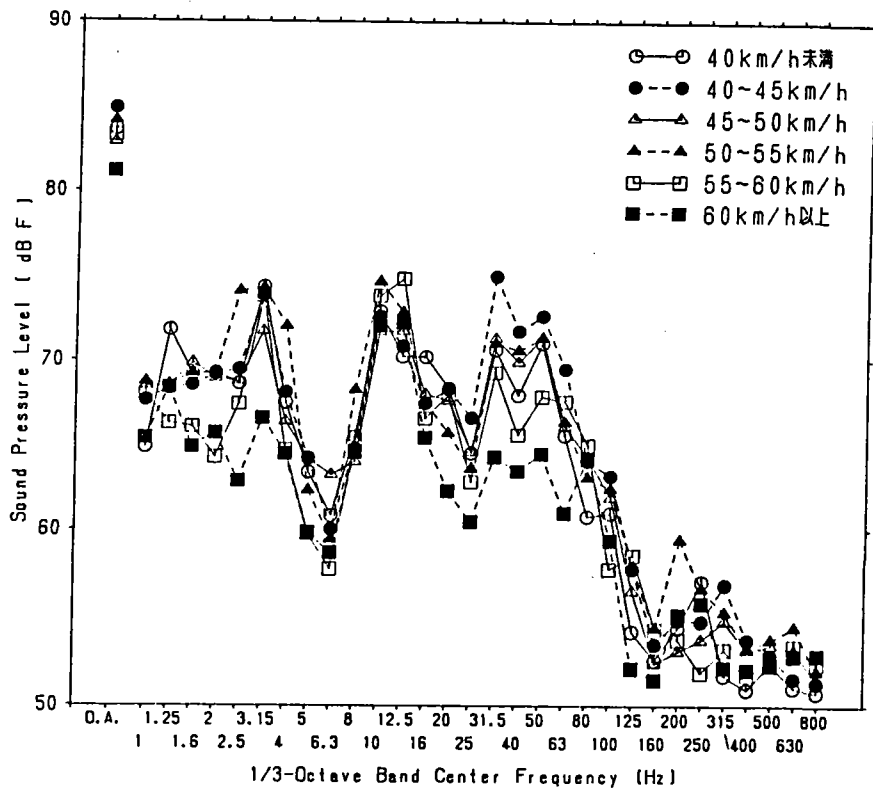
c) FFTアナライザによる振動加速度の分析

FFTアナライザにより、同一の車両について、下流側の足利側支承部、太田側支承部、1/4スパン、スパン中央と上流側のスパン中央の5点で測定した振動加速度を生波形（サンプリングの周波数100 Hz, 個数1024個）で分析した結果の一例を図-28に示す。なお、これらのデータは、別途振動加速度の詳細な測定より得たものである。

この分析から、上・下流側のスパン中央の振動加速度の位相は、一致しており、橋軸直角方向の“ねじれ振動”を考慮しなくてもよいと考えられる。

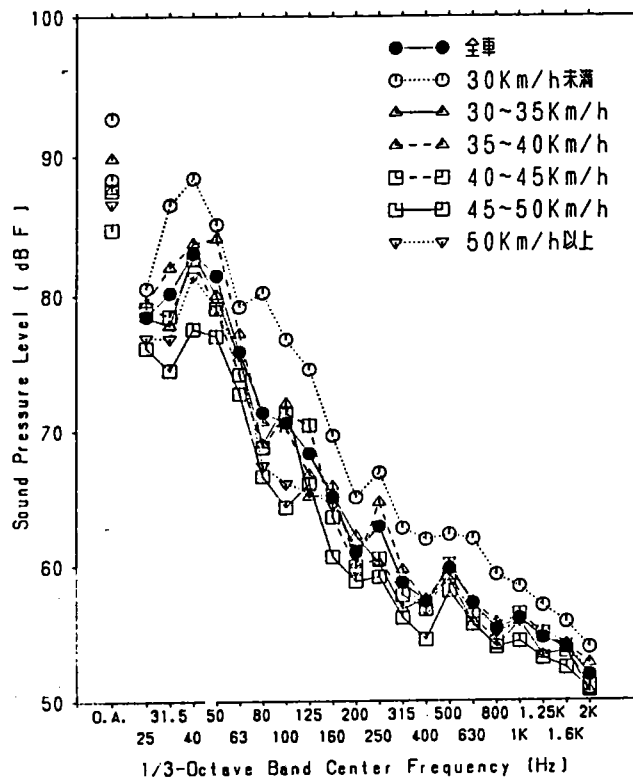


【葉鹿橋 B 1】

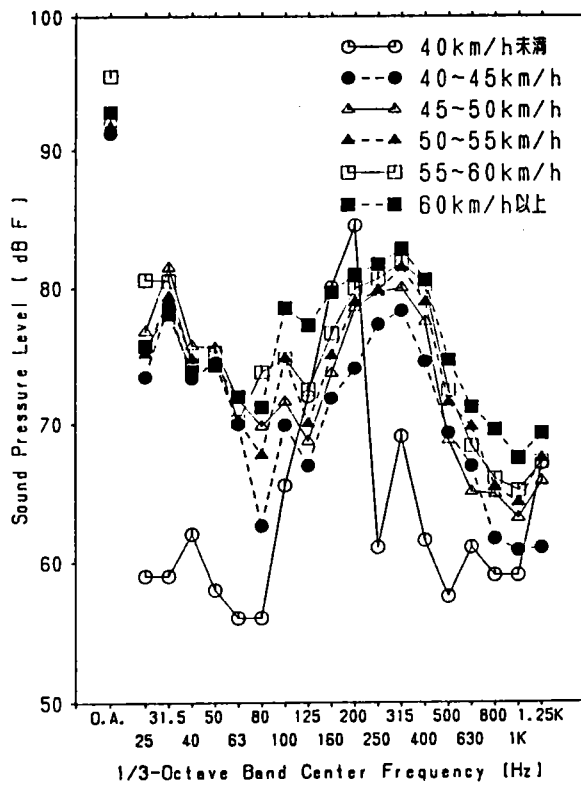


【葉鹿橋 B 2】

図-18 葉鹿橋 B・床版直下騒音の速度別周波数分析結果

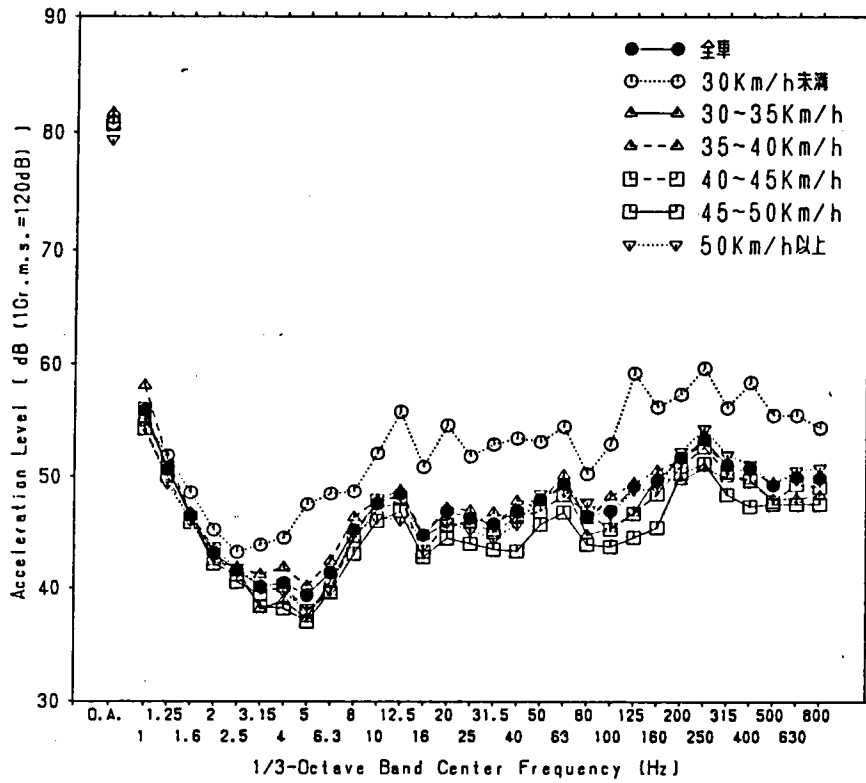


【葉鹿橋 B 1】

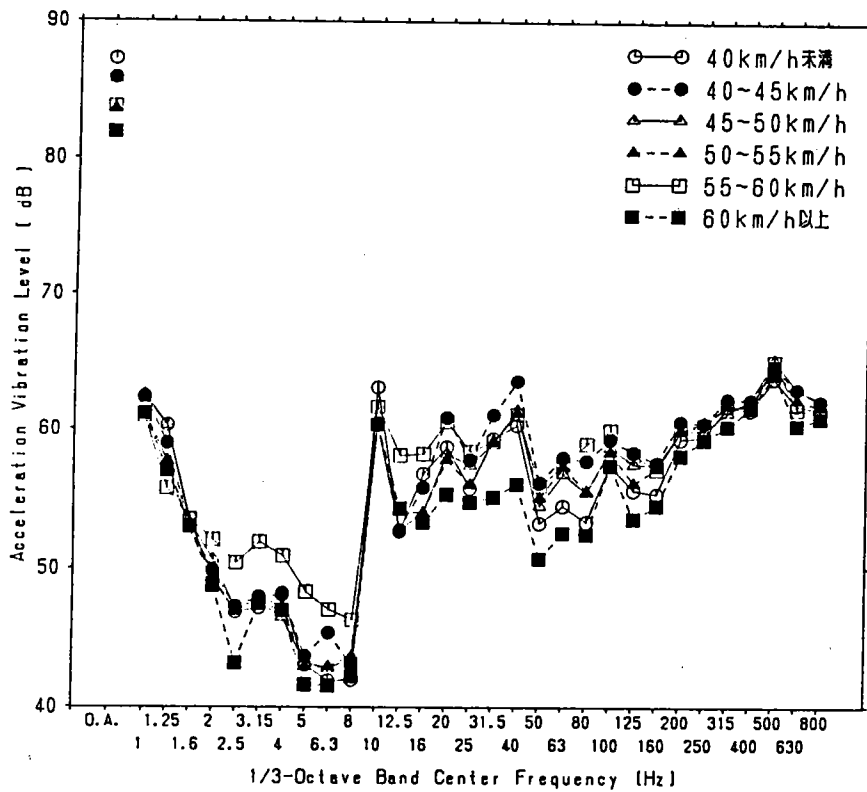


【葉鹿橋 B 2】

図-19 葉鹿橋 B・支承部騒音の速度別周波数分析結果

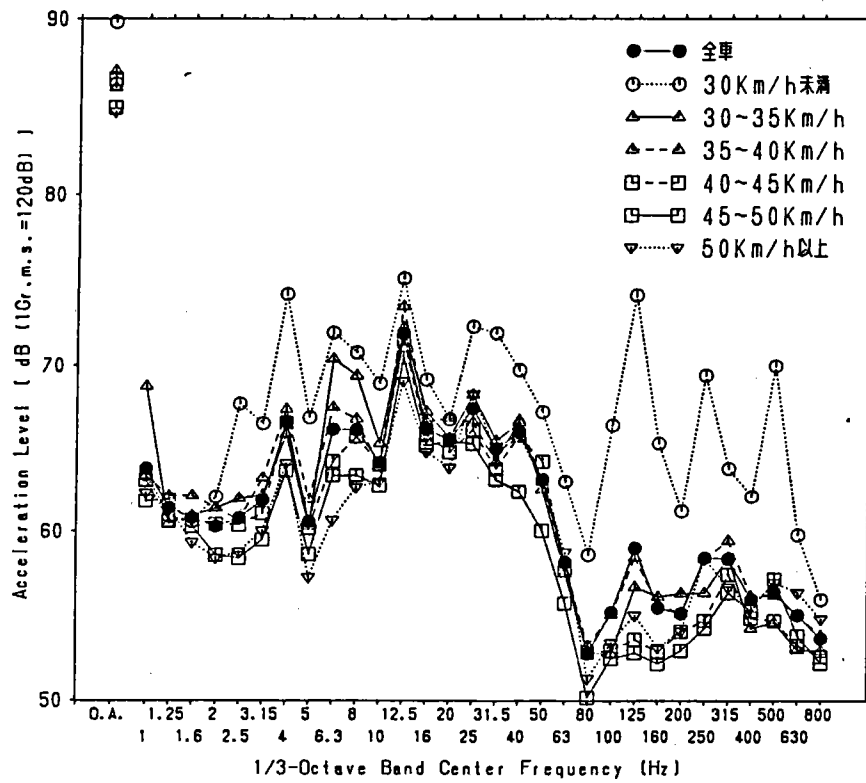


【葉鹿橋 B1】

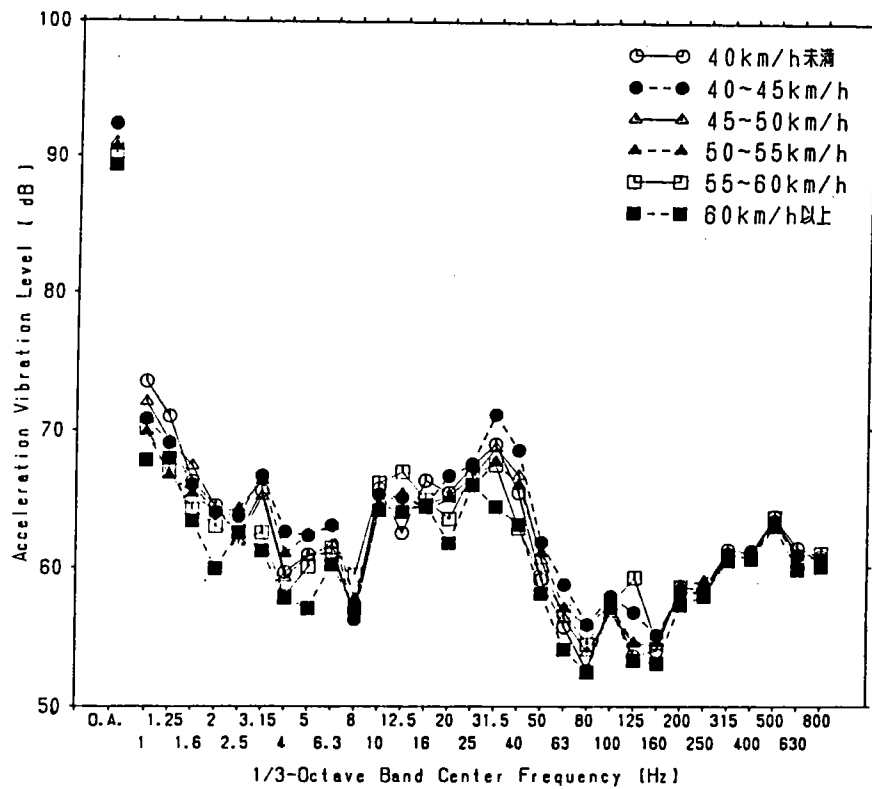


【葉鹿橋 B2】

図-20 葉鹿橋 B・支承部振動加速度の速度別周波数分析結果

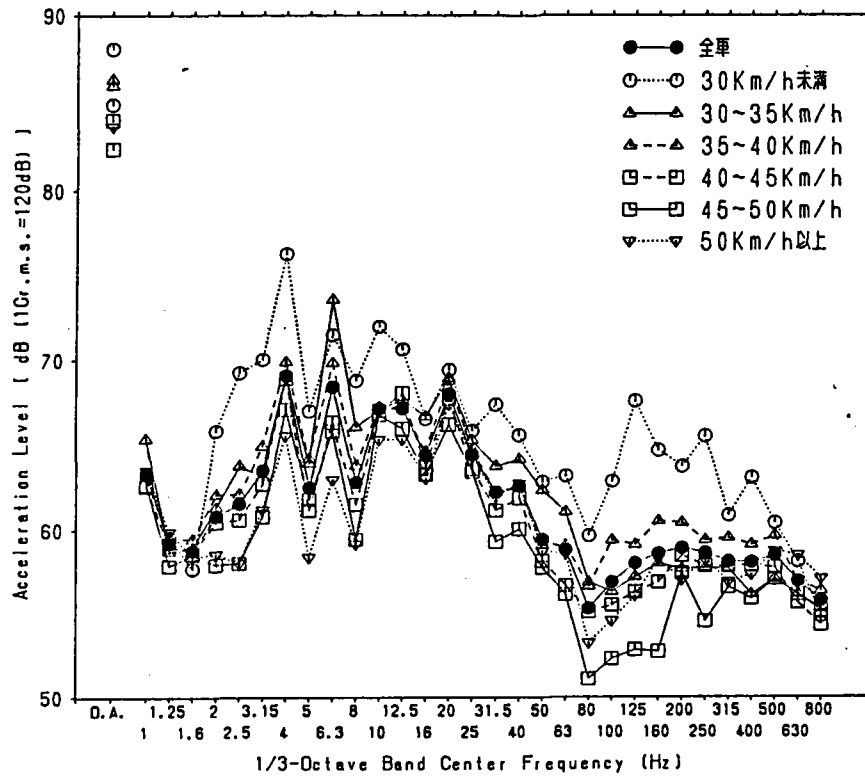


【葉鹿橋 B 1】

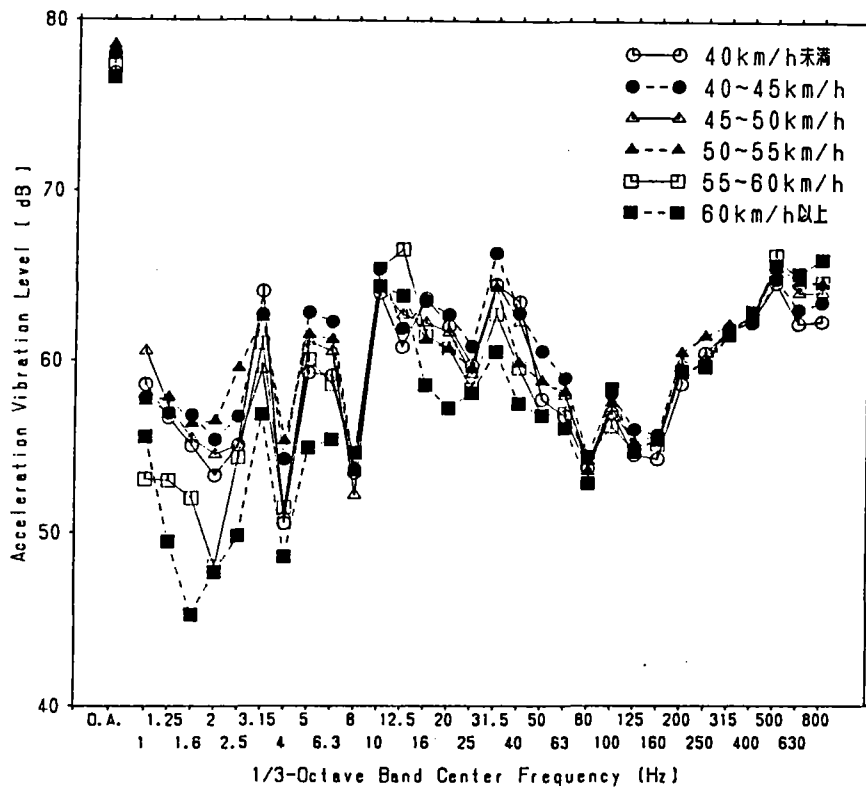


【葉鹿橋 B 2】

図-21 葉鹿橋 B・1 / 4 スパン振動加速度の速度別周波数分析結果

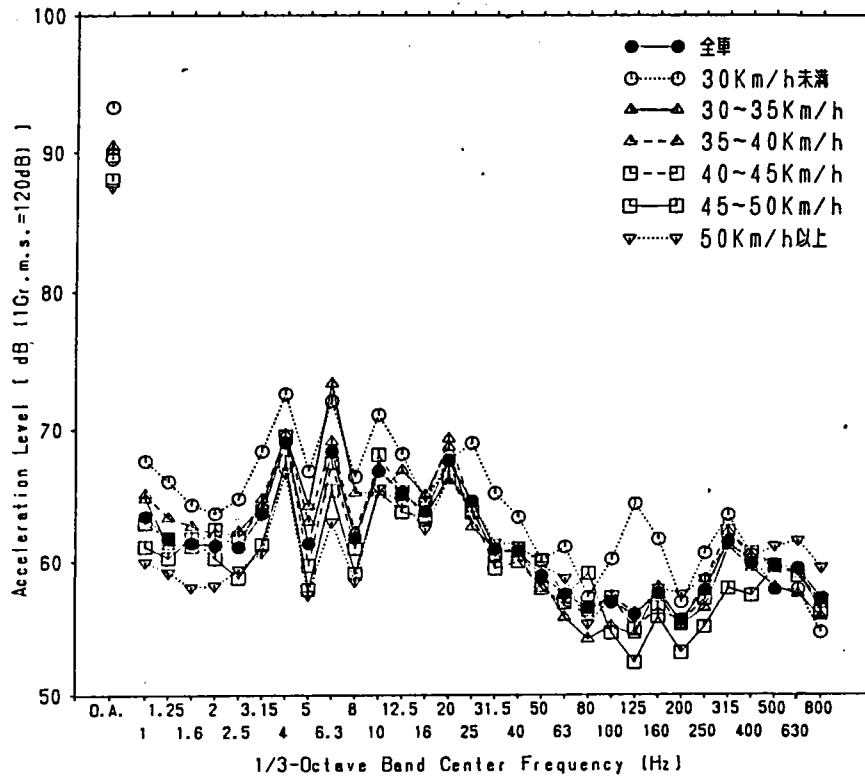


【葉鹿橋 B 1】

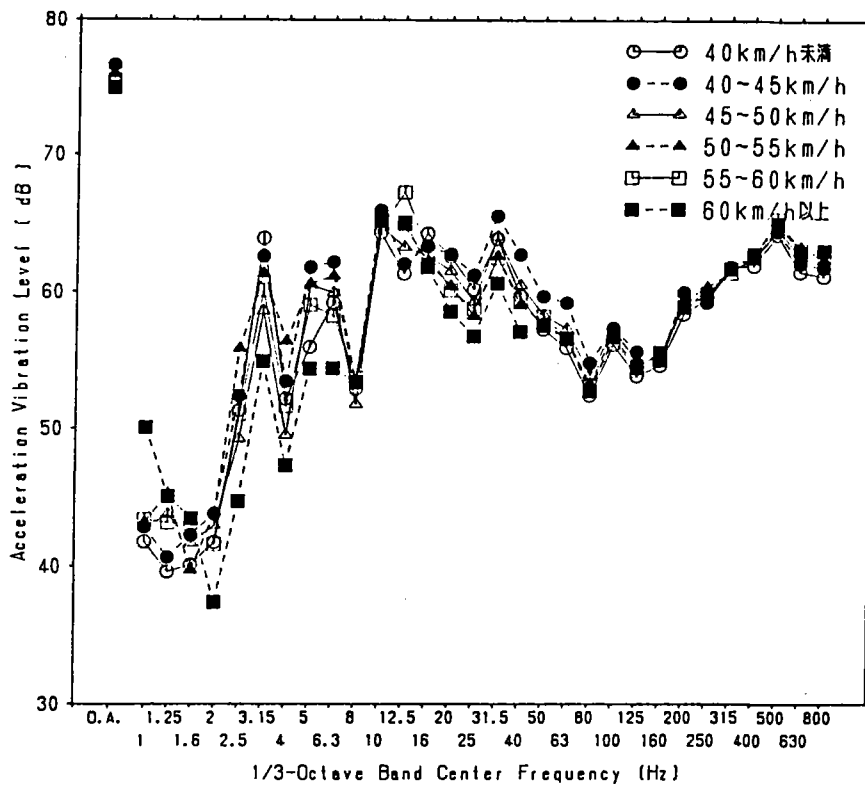


【葉鹿橋 B 2】

図-22 葉鹿橋 B・スパン中央(下流側)振動加速度の速度別周波数分析結果

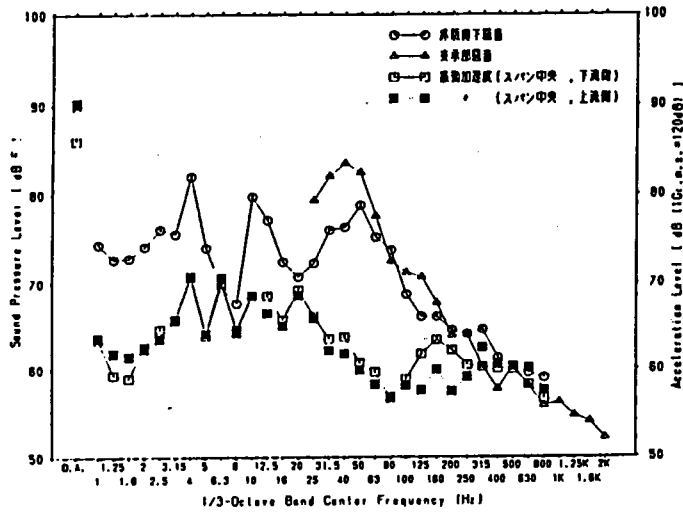


【葉鹿橋 B 1】

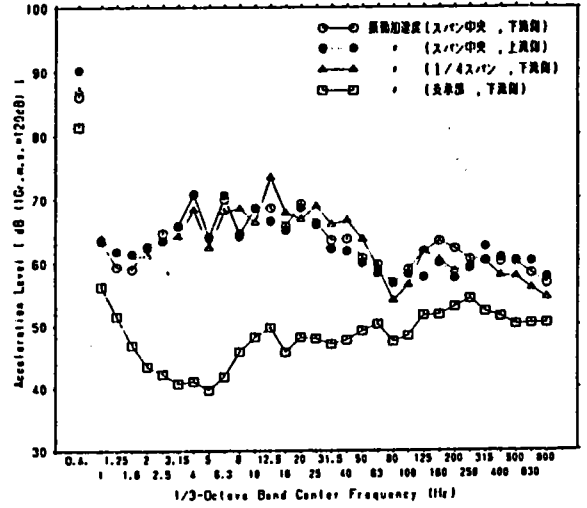


【葉鹿橋 B 2】

図-23 葉鹿橋 B・スパン中央(上流側)振動加速度の速度別周波数分析結果

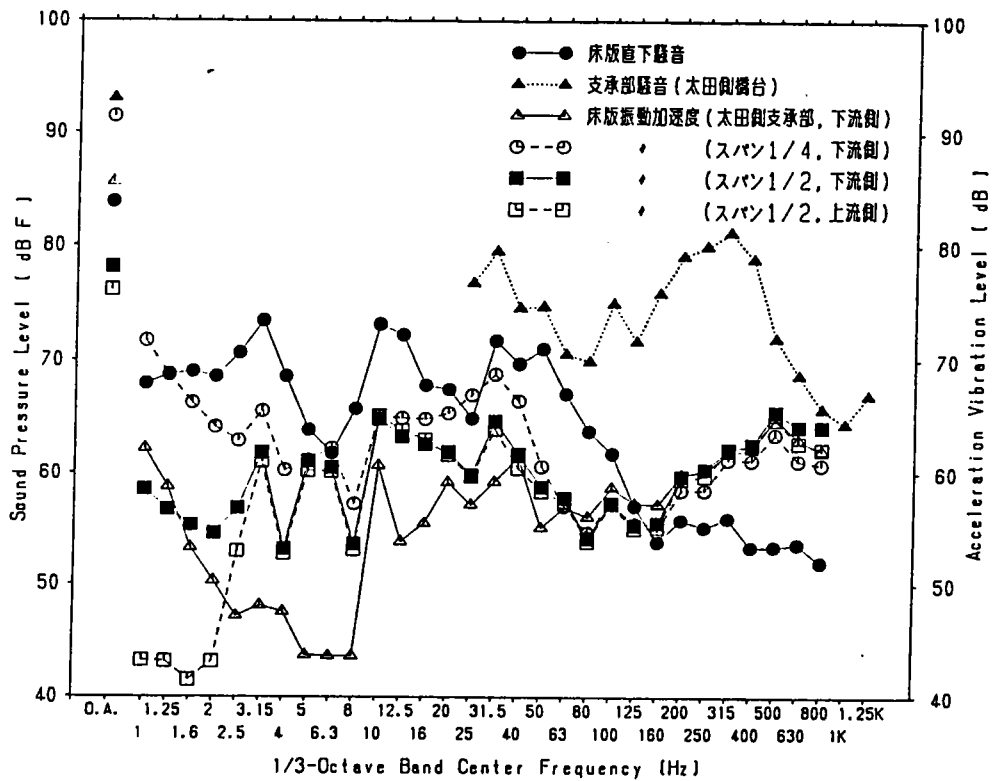


騒音・振動加速度の周波数分析結果



振動加速度の周波数分析結果

【葉鹿橋 B 1】



【葉鹿橋 B 2】

図-24 葉鹿橋 B・騒音と振動加速度の周波数分析結果

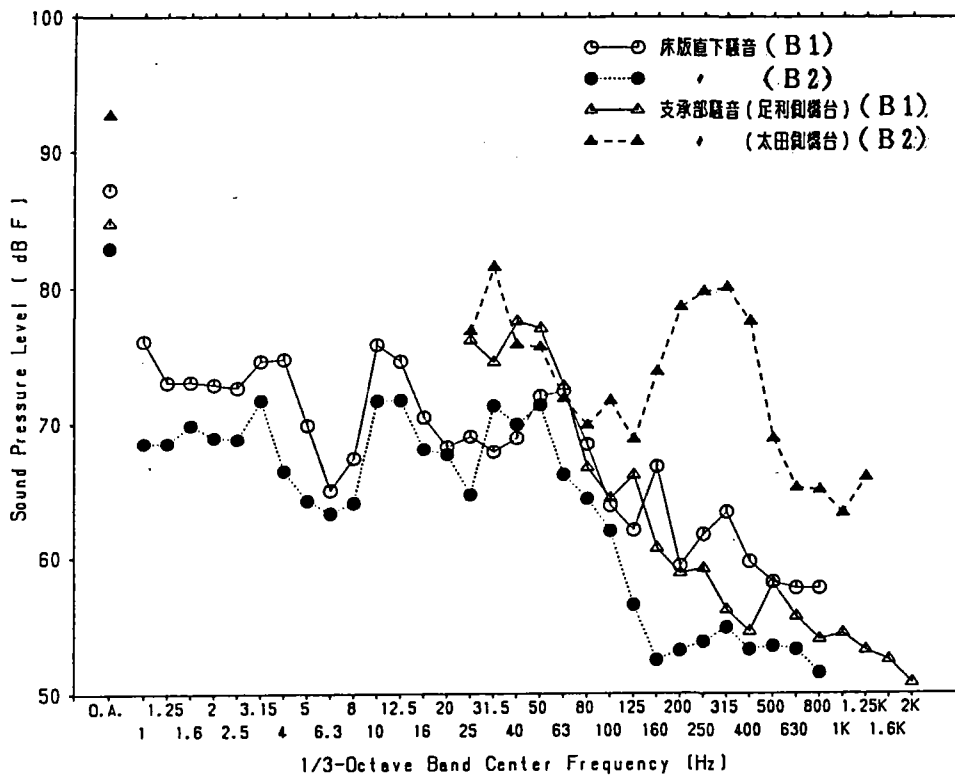


図-25 葉鹿橋B・騒音の周波数分析結果の比較

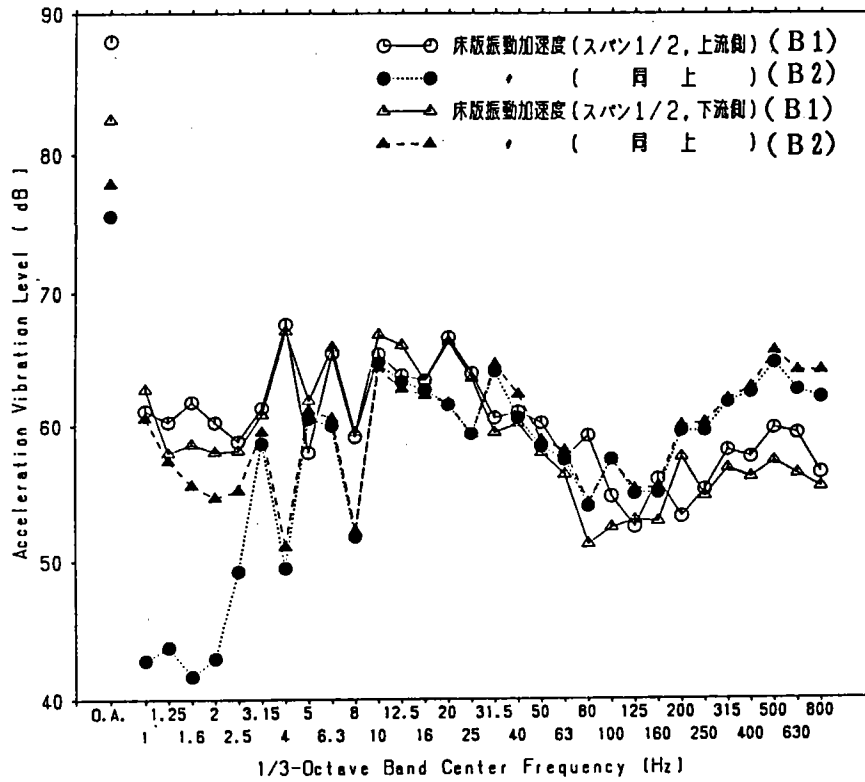


図-26 葉鹿橋B・振動加速度の比較(1)

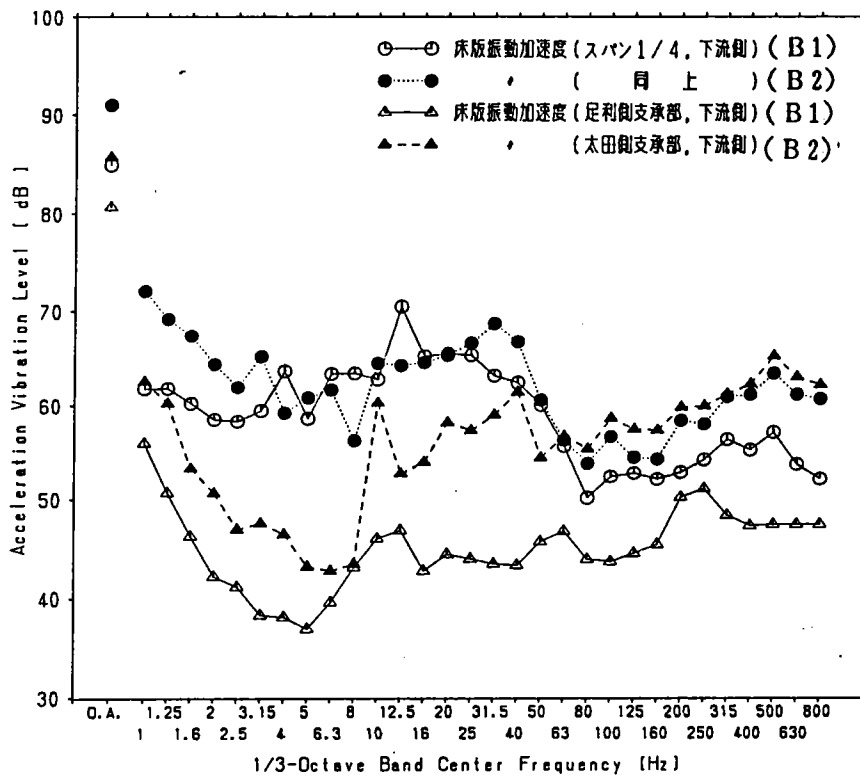
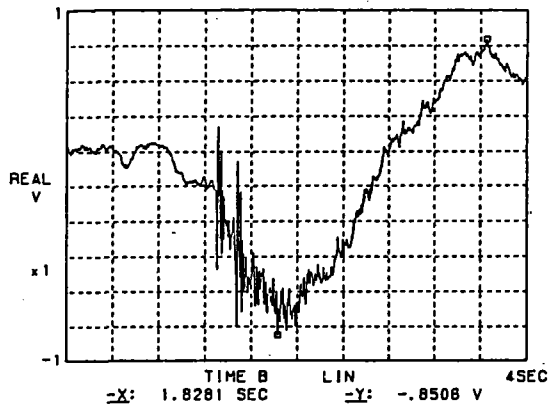
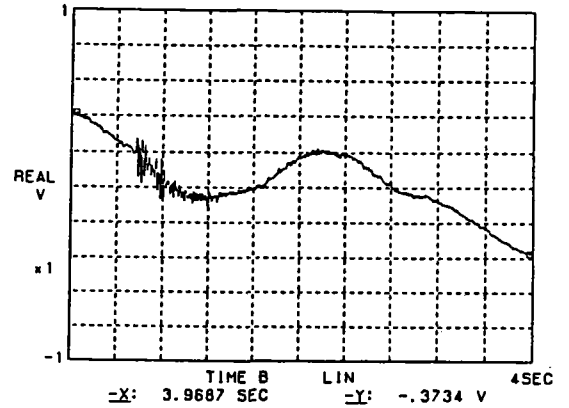


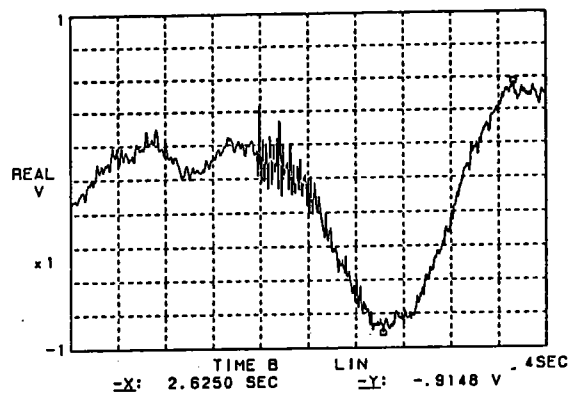
図-27 葉鹿橋B・振動加速度の比較(2)



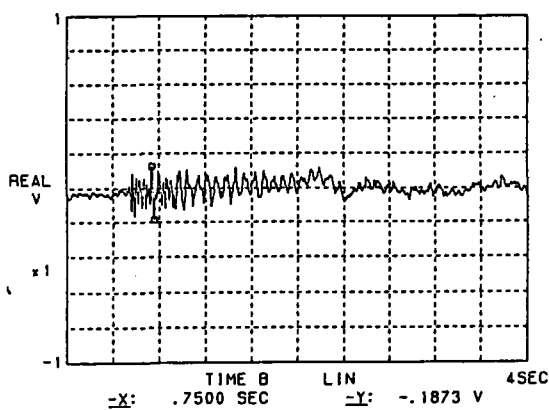
【下流側・足利側支承部】



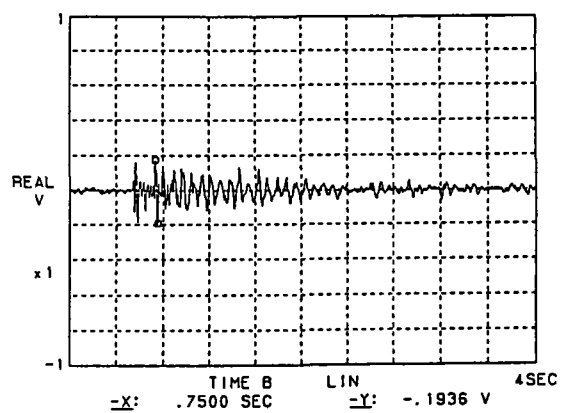
【下流側・太田側支承部】



【下流側・1/4 スパン】



【下流側・スパン中央】



【上流側・スパン中央】

図-28 振動加速度の生波形

d) 有限要素法“平面トラス”モデルによる固有振動数、固有モードの解析

葉鹿橋 B2 を“平面トラス”にモデル化し、その固有振動数及び固有振動モードを市販のプログラム（※）を用いて、パソコンで求めた。

その際、コンクリート床版を下弦材にどのように含めるかで次のような 2 つのモデルを考えた。

◎モデル①…コンクリート床版は、下弦材と分離されていると考える。

この場合、コンクリート床版は、トラスに対して“重量”としてだけ作用する。

◎モデル②…コンクリート床版は、下弦材と一体化と考える。

この場合、下弦材の断面積にコンクリート床版を含めることでモデル化する。

〔 ※Mario Paz、木村欽一訳：「パソコンで解く 振動と力」、丸善株、1990
上記の本に付属するプログラム Plane Truss, Jacobi を使用。 〕

以上の考えに基づいて、図-29 に示すような部材番号及び節点の“平面トラス”モデルを作成した。このとき、各部材の諸元は、表-5 に示す通りである。

計算の結果は、固有振動数については、表-6 に示し、そのときの固有振動モードについては、図-30 に示す。

モデル②の解析から得られた葉鹿橋 B2 の固有振動数は、騒音・振動加速度のスペクトルの卓越周波数にほぼ対応していると考えられる。

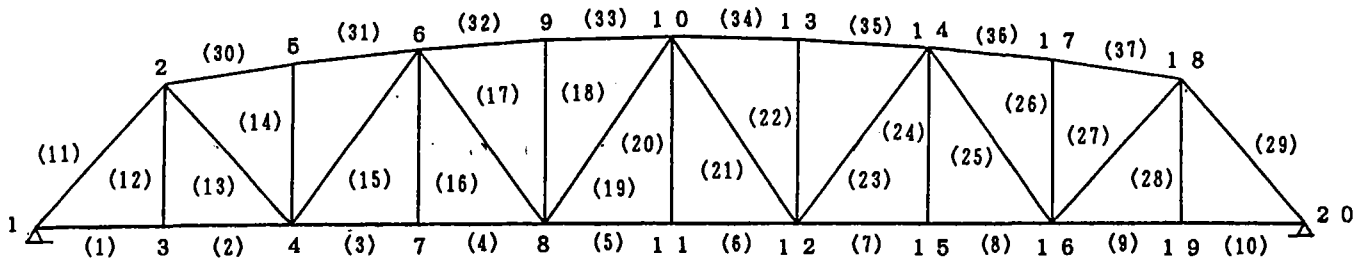


図-29 “平面トラス”モデルに用いた部材番号と節点番号

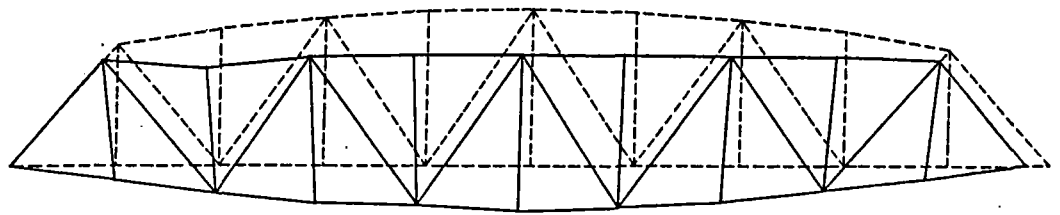
表-5 “平面トラス”モデルに用いた各部材の諸元一覧

番号	長さ (cm)	断面積 (cm ²)		重量 (tf)	コンクリートの重量 (tf)	番号	長さ (cm)	断面積 (cm ²)	重量 (tf)	番号	長さ (cm)	断面積 (cm ²)	重量 (tf)	番号	長さ (cm)	断面積 (cm ²)	重量 (tf)
		モデル①	モデル②														
1	545	100.26	1590.97	0.429	10.29	11	848	143.78	0.957	21	1010	88.56	0.702	31	547	122.10	0.529
2	"	"	"	"	"	12	650	55.08	0.271	22	838	62.28	0.409	32	546	147.16	0.631
3	"	"	"	"	"	13	848	64.98	0.433	23	968	62.28	0.473	33	545	"	"
4	"	127.80	1618.51	0.547	"	14	738	62.28	0.361	24	800	55.08	0.346	34	546	"	"
5	"	"	"	"	"	15	968	68.56	0.521	25	968	68.56	0.521	35	546	"	"
6	"	"	"	"	"	16	800	55.08	0.341	26	738	62.28	0.361	36	545	122.10	0.522
7	"	"	"	"	"	17	968	62.28	0.473	27	848	64.98	0.433	37	546	122.10	"
8	"	100.26	1590.97	0.429	"	18	837	62.28	0.409	28	650	55.08	0.271				
9	"	"	"	"	"	19	1010	88.56	0.702	29	848	143.78	0.945				
10	"	"	"	"	"	20	850	55.08	0.368	30	552	122.10	0.529				

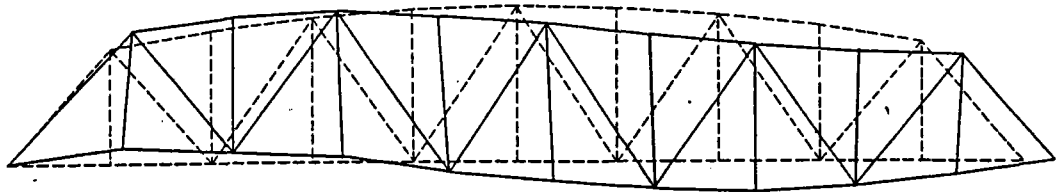
-33-

表-6 固有振動数の計算結果

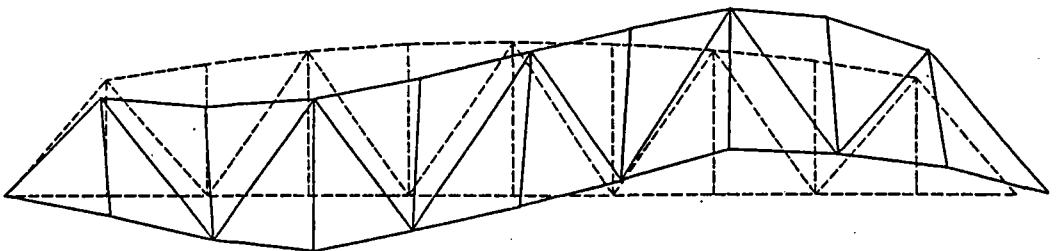
	モデル①	モデル②
1次	2.6 Hz	3.6 Hz
2次	5.7 Hz	8.6 Hz
3次	8.0 Hz	12.5 Hz
4次	11.9 Hz	16.3 Hz
5次	15.3 Hz	17.5 Hz



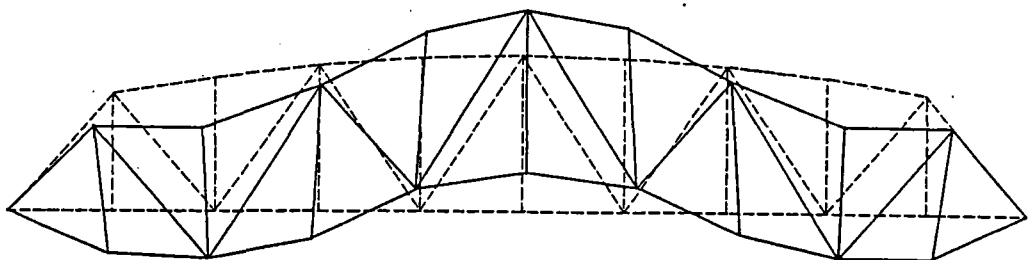
【1次モード】



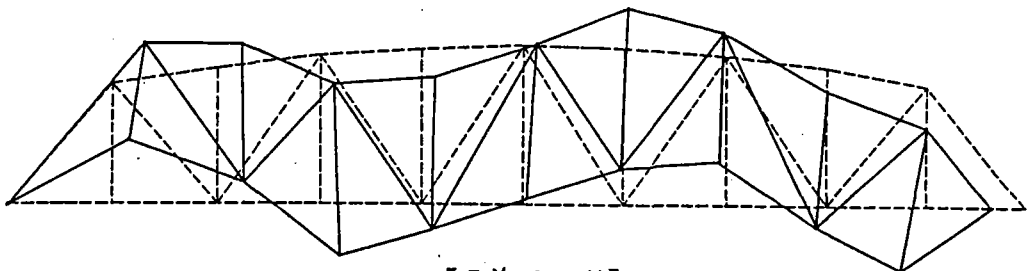
【2次モード】



【3次モード】



【4次モード】



【5次モード】

図-30 “平面トラス”モデルの固有振動モード

(3) 田中橋

a) 8mmビデオ解析による通過交通分析

田中橋では、橋上で停止してしまう車両や同時にスパン中央ですれ違う車両を除いて分析することにした。分析対象の通過交通の概要は、表-7に示す。また、田中橋の8mmビデオ解析による普通車の方向別速度分布を図-31に示す。なお、右折車線に車両が停止している状態を「渋滞」、それ以外を「非渋滞」としている。

表-7 田中橋の通過交通の概要

	伊勢南町→田中町			田中町→伊勢南町			両方向		
	非渋滞	渋滞	合計	非渋滞	渋滞	合計	非渋滞	渋滞	合計
大型車	4	0	4	4	1	5	8	1	9
普通車	72	24	96	87	16	103	159	40	199
その他	3	0	3	5	1	6	8	1	9
合計	79	24	103	96	18	114	175	42	217

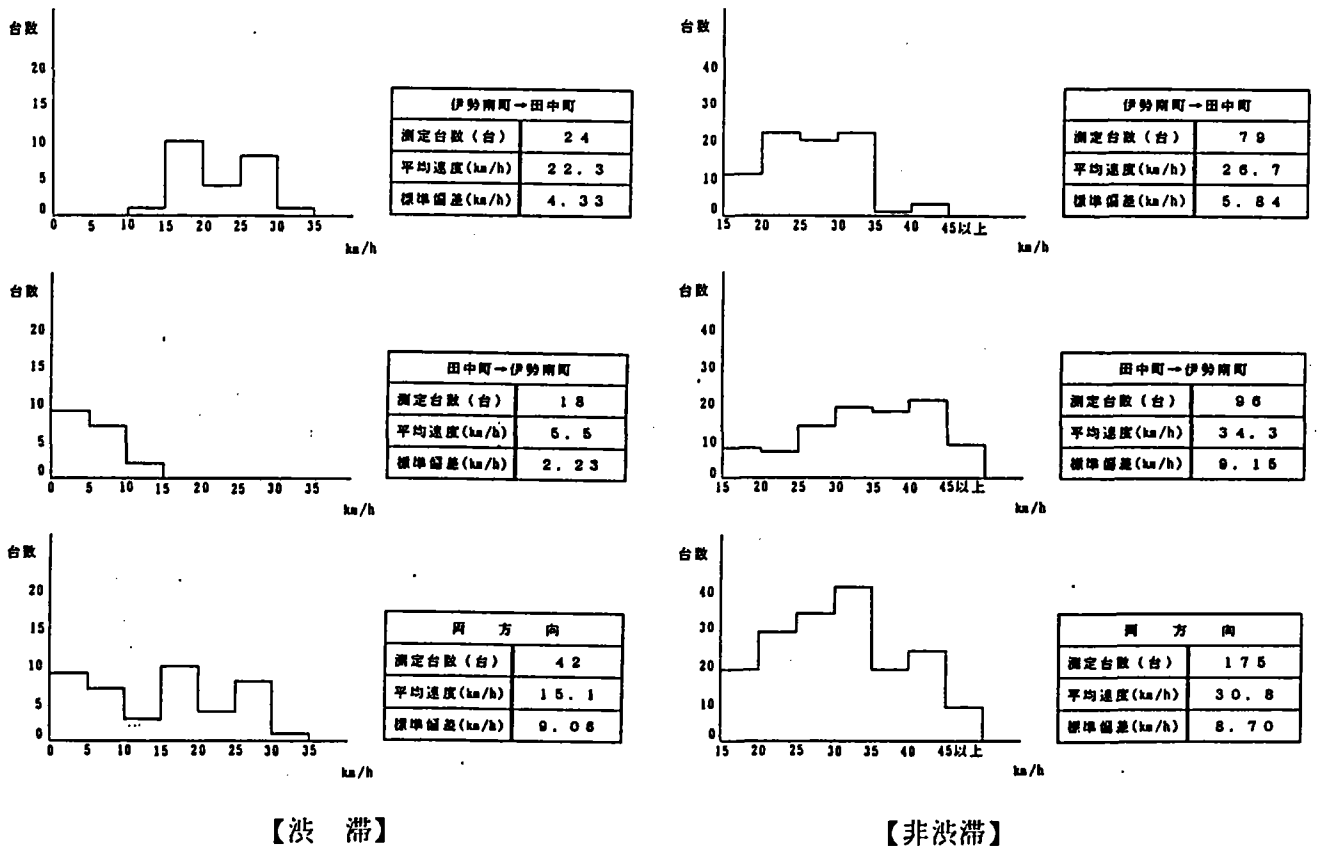


図-31 分析対象車両の方向別速度分布

b) 騒音・振動加速度レベルの1/3オクターブ周波数分析

橋梁の騒音や振動は、通過車両の通行状態・進行方向・車種・速度によって変化することが考えられる。そこで、これらを分類して、周波数分析結果の比較を行ったが、車種による違いはあるものの、スペクトルの形自体はほとんど変わりなく、レベルの違いだけであり、すべての測点で違いはほとんど見られなかった。

このため、騒音や振動は、車両の通行状態・進行方向・車種・速度によって分けることなく、通過する全ての車両を対象としてパワー平均したもので、周波数分析を行うことにした。

これらの分析結果をまとめたものが図-32であり、次のようなことがわかった。

- ①通過車両の進行方向・速度・通行状態によるスペクトルの相違は、余り大きくなく、それらの影響は小さい。なお、通行状態については、「渋滞」時には「非渋滞」時に比べて、低周波領域の騒音振動が大きくなり、逆に高周波領域の騒音振動が小さくなる傾向が見られた。これは、「渋滞」時の多数車両による“質量効果”ではないかと考えられる。
- ②通過車両の車種によって、騒音・振動のスペクトルを比較したところ、大型車の方が普通車よりもO. A. 値で約7 dB程度大きい、そのスペクトルは、普通車とほぼ同じ形であることがわかった。
- ③床版直下騒音と支承部騒音のスペクトルは、ほぼ一致し、支承部での衝撃音の影響はないことがわかった。
- ④騒音と振動加速度のスペクトルの形は、ほぼ一致しており、共に3.15 Hz、16 Hzに卓越周波数を持つことがわかった。

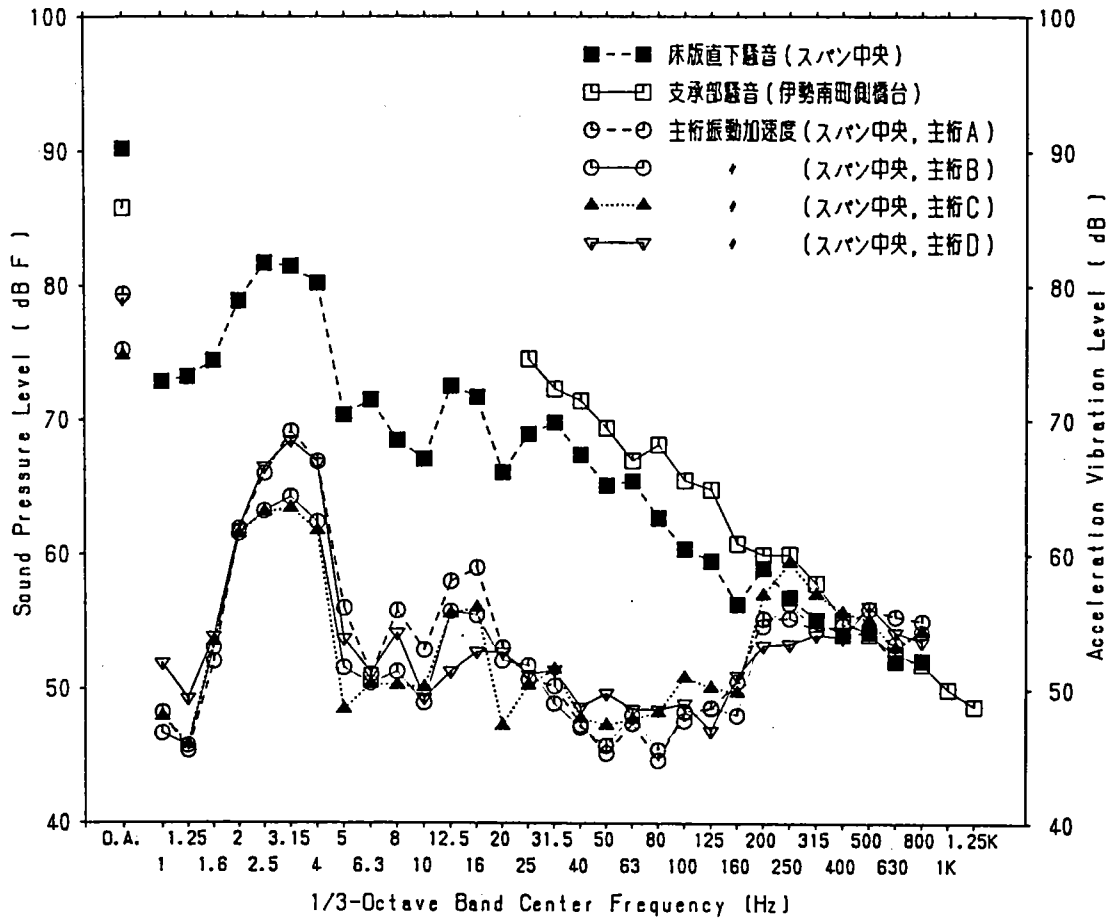
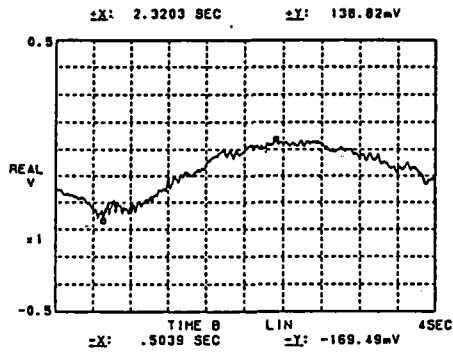


図-32 田中橋・騒音と振動加速度の周波数分析結果

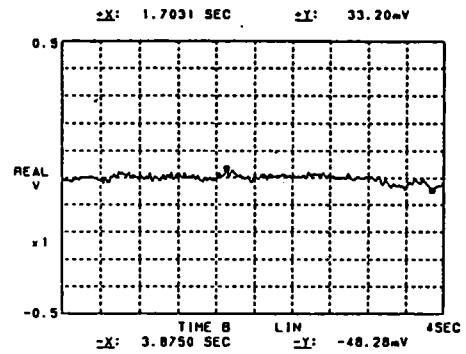
c) FFTアナライザによる振動加速度の分析

FFTアナライザにより、同一の車両について、主桁A, B, C, Dのスパン中央部、主桁Bの1/4スパン部と伊勢南町側支承部の6点で測定した振動加速度を生波形（サンプリングの周波数100Hz, 個数1024個）で分析した結果の一例を図-33に示す。なお、これらのデータは、別途振動加速度の詳細な測定より得たものである。

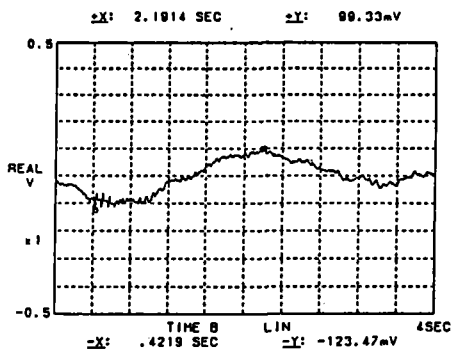
この分析から、主桁A, Cのスパン中央部の振動加速度の低周波領域での位相は、逆転しており、橋軸直角方向の“ねじれ振動”を考慮しなければならないと考えられる。



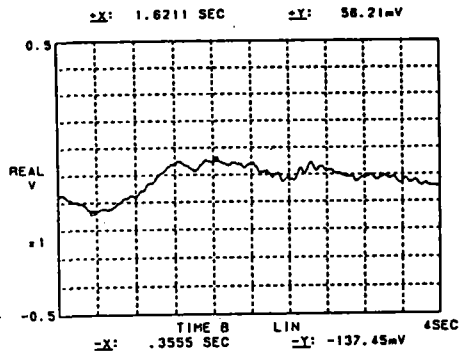
【主桁A・スパン中央部】



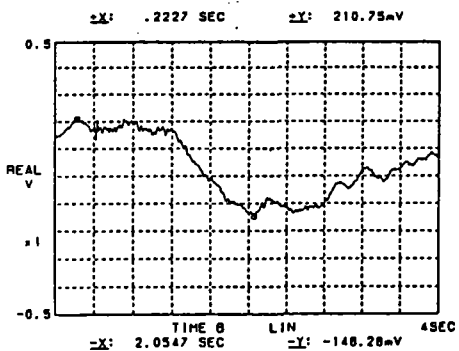
【主桁B・スパン中央部】



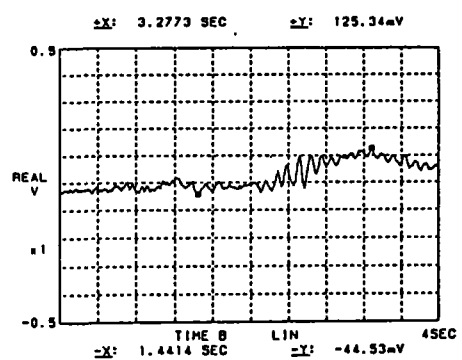
【主桁C・スパン中央部】



【主桁B・1/4スパン部】



【主桁D・スパン中央部】



【主桁B・伊勢南町側支承部】

図-33 振動加速度の生波形

d) 田中橋の固有振動数・固有モードの解析

田中橋の固有振動数を求めるため、まず、田中橋を“単純ばり”としてモデル化し、計算したところ、約1.4 Hzという結果が得られた。しかし、測定で得られた卓越周波数は、3.15 Hzであり、大きく異なった。これは、田中橋が、全幅12.8 m、支間長50 mのかなり幅広の橋であるためだと考えられた。

そこで、次に、“4点単純支持の板”としてモデル化し、計算したところ、約1.6 Hzという結果がでたが、やはり測定で得られた卓越周波数と大きく相違した。

これらの結果を踏まえ、有限要素法“連続ばり”モデルによる解析を行うことにした。

なお、計算は、葉鹿橋B2の場合と同様に、Mario Paz, 木村欽一訳：「パソコンで解く 振動と力」、丸善(株)、1990 に付属するプログラム Beam, Jacobi を使用した。

この解析のため田中橋を図-34に示すような25節点、24要素の“連続ばり”とした。このとき、各部材の諸元は、表-8に示す通りである。なお、節点1, 5, 9, 13, 17, 21, 25は支点であり、節点4および22は“ヒンジ”である。

計算の結果は、固有振動数については、表-9に示し、そのときの固有振動モードについては、図-35に示す。

この結果から、測定から得られる卓越周波数は、“連続ばり”モデルから計算された1次～8次までの固有振動数の振動モードが重なり合った結果生じたものと考えられる。

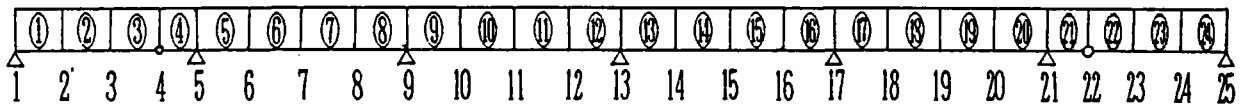


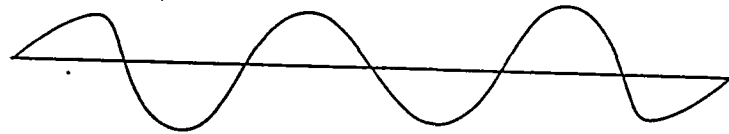
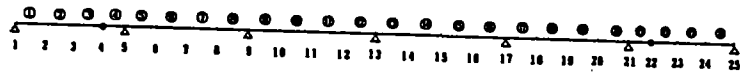
図-34 “連続ばり”モデルに用いた部材番号と節点番号

表-8 “連続ばり”モデルの諸元一覧

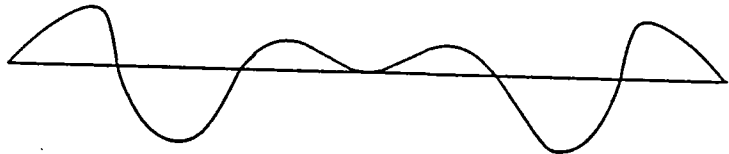
部材番号	部材長 (cm)	重量 (tf)	鋼換算断面2次モーメント (cm ⁴)
1～3	1200	97.89	20,140,000
4	1220	99.52	”
5～20	1250	101.97	”
21	1220	99.52	”
22～24	1200	97.89	”

表-9 固有振動数の計算結果

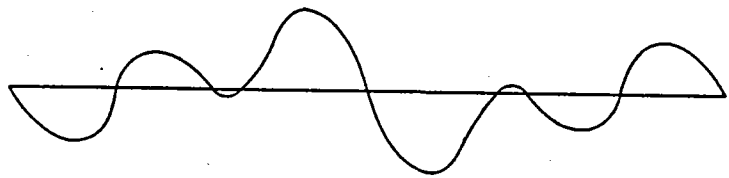
1次	1.3 Hz	5次	2.8 Hz
2次	1.4 Hz	6次	3.0 Hz
3次	2.0 Hz	7次	4.4 Hz
4次	2.5 Hz	8次	4.5 Hz



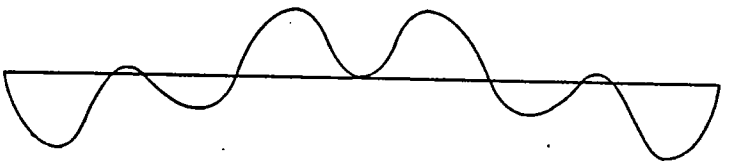
【1次モード】



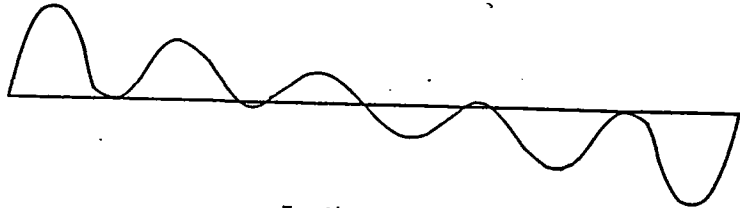
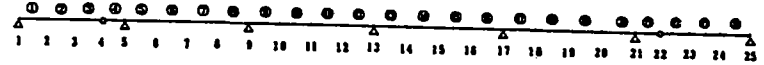
【2次モード】



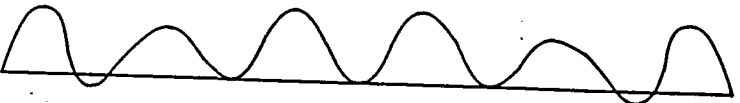
【3次モード】



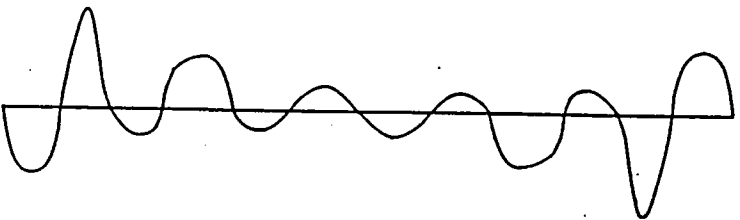
【4次モード】



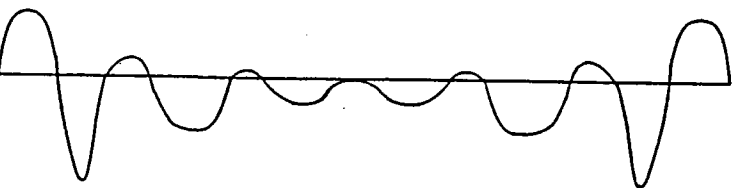
【5次モード】



【6次モード】



【7次モード】



【8次モード】

図-35 “連続ばり”モデルの固有振動モード