

## 高架道路の構造物音の調査およびその予測に関する検討

交通環境室 環境技術課 西 林 素 彦  
交通環境室 環境技術課 有 馬 伸 広  
保全施設部 保全企画課 富 田 穰

### 要 旨

高架道路を発生源とする騒音は、伝達経路の違いにより①直接音、②路下車両音の高架裏面反射音、③高架構造物自体の振動により発生し放射される音（以降「高架構造物音」という）に分けられる。①②については、過去に多くの調査、研究成果があり、騒音を予測する上で正確に考慮されている。③については、実測結果は少なく、その予測手法も確立されていなかった。しかし、最近の騒音予測手法(ASJ Model 1998)では、高架構造物音を音源の一つとして新しく盛り込まれており、高架道路周辺の騒音をより正確に予測し、それに対する適切な対策を提案する必要性が生じてきている。このことから、神戸線を対象にして、構造物の振動速度、振動の音響放射効率、放射音の音響強度を主桁及び床版種別毎に測定し、分析を行った。そして、実測結果に基づいた高架構造物音の音響パワーレベルとその周波数特性の設定式を提案した。

キーワード：高架構造物音、予測モデル、高次振動、音響放射効率、パワーレベル

### まえがき

阪神高速道路のように高架道路が平面道路上に併設されている場合では、自動車から直接沿道に到達する直接音や、平面道路からの音が高架裏面で反射して到達する高架裏面反射音の他に、高架構造物自体の振動が音に変換され放射される高架構造物音が確認されている。このうち直接音の伝搬は、主に幾何的減衰、回折、地表面の影響を扱うものであり、その予測モデルも確立されている<sup>1)</sup>。また、高架裏面反射音についても多数の研究がなされており、公団でも予測モデルを提案している<sup>2)</sup>。これらに比べて高架構造物音は、構造物の高次の振動が関連し<sup>3)</sup>、構造物近傍（桁裏）での調査が必要となることから実測による調査結果は少ない<sup>4),5)</sup>。

しかし、音響学会が提案した最新の騒音予測モ

デル(ASJ Model 1998)においては、実測結果から求められた大型車走行時の高架構造物の平均パワーレベルを与えることにより、高架構造物音の影響を盛り込んでいる<sup>1)</sup>。ただし、その中では構造形式、走行速度等の違いは考慮されていない。また、高架構造が大半を占める当公団としても、さらに精度の高い騒音予測を要求されていることから、阪神高速道路特有の交通特性を踏まえ、主な橋種の高架構造物音の実態を個々に把握する必要がある。

そこで、高架構造物音の基本特性を把握するために、3号神戸線を対象とした実態調査を平成10年度に実施した。具体的には、高架構造物の振動速度、振動の音響放射効率及び放射音の音響強度を構造種別毎に測定しており、その影響を適切に予測モデルに組み入れることを念頭においている。そして、その結果を基に、高架構造物音の音

響パワーレベル及びその周波数特性の設定式を提案した。

## 1. 高架構造物音の発生メカニズム

高架道を自動車が走行するとき高架構造物は加振され、その振動は構造物と接する空気を加振し、音波として放射される。ただし、構造物の振動は100%音波に変換されるのではなく、音波への変換時にいくらかの損失が生じる。今回、高架構造物音を調査するに当たり、次のようなメカニズムを想定している。

- ① 自動車の走行による道路構造物の加振  
(数100 Hzの周波数域)
- ② 振動の各部材への伝搬
- ③ 各部材からある放射効率で音波に変換
- ④ 高架構造物音として放射

今回の調査では、各構造物部材の振動速度の測定、振動から音波への変換効率の測定、高架構造物からの放射音の強さの測定が、それぞれ②、③、④の特性を把握することを目的としている。なお、①については、タイヤ面の溝形パターンおよび回転数から推定される周波数とそのときの床版の振動周波数が一致し、これらによる影響が大きいと

考えられている<sup>6)</sup>。

なお、高架構造物音は低周波音と類似しているが、高架構造物音が可聴域の音波であり、500~1,000 Hzが主要な周波数成分であることと、発生メカニズムに関して、低周波音は、路面上を車体(質量)通過する際の構造物(床版)のたわみが、通過後に自由振動することにより放射される音波が主であるのに対し、高架構造物音は、タイヤパターンによる路面の加振が構造物全体に伝搬し音波として放射される点が異なっている。

## 2. 高架構造物音の実態調査

### 2-1 調査箇所の概要

今回の調査では、鋼桁を対象とし、主桁形状でI桁と箱桁、床版タイプでコンクリート系床版と鋼床版に分類して、表-1に示す実測箇所を選定した。図-1に示すように、いずれの箇所も4車線幅員で路下を平面道路が併走しており、測定は、高架裏面に設置されている高架裏面吸音板上で行った。また、走行車両のジョイント通過時に発生する衝撃音の影響を避けるために、連続桁でジョイント部から1径間以上離れた場所を測定点として選定している。

表-1 調査箇所の概要

番号	桁構造	床版	桁数	桁高さ	桁幅	支間長	交通量 <sup>2)</sup>	大型車 <sup>2)</sup>	速度 <sup>3)</sup>
①	鋼箱桁(9径間連続)	鋼床版	2	1.48	2.00	35.0	99,900	25,500	71
②	鋼I桁(4径間連続)	RC床版	6	2.00	----	36.0	99,900	25,500	71
③	鋼箱桁(3径間連続)	軽コン非 <sup>1)</sup>	2	3.95	2.80	90.0	65,300	15,800	79
④	鋼I桁(3径間連続)	鋼床版	6	2.30	----	40.0	71,700	19,400	68

注. 1) 軽コン非: 軽量コンクリートの非合成床版, 2) 交通量・大型車: 台/日, 3) 速度: 日平均走行速度(km/h)

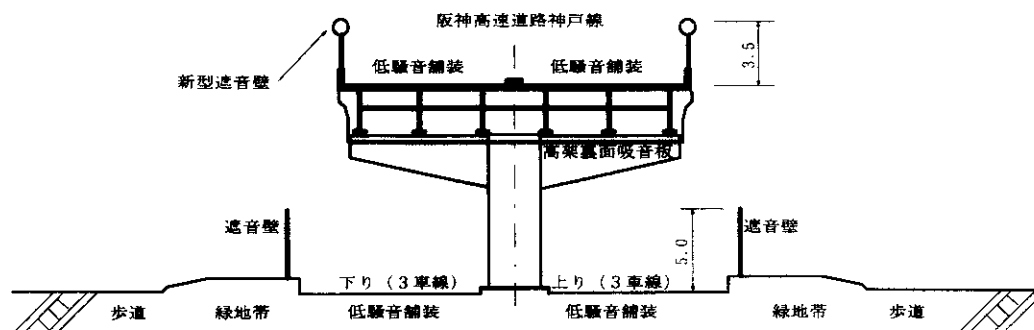


図-1 調査場所の標準断面図(単位:m)

## 2-2 測定概要

### (1) 構造物の振動速度

支間中央および支間1/4部分の図-2に示す面に1橋梁当たり合計約100点の測定点を設定し、車両の通過に伴う構造部位の振動速度を測定した。測定時間は約4分/点である。実際には現地では振動加速度を録音し、分析時に振動速度に変換している。

(鋼箱桁)



(鋼I桁)

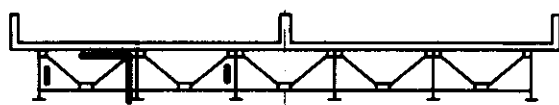


図-2 振動速度の測定範囲(太線部分)

### (2) 音響放射効率

構造物の振動がどの程度音波に変換、放射されるかを把握するために、鋼桁とコンクリート床版の振動速度及び音圧の実測を行い、それを基に放射効率を算定した。測定点は、鋼桁とコンクリート床版の振動速度測定点のうちから桁や床版の中央付近のものを、1橋梁当たり10~20点を対象として選定している。そして、振動ピックアップマイクの近傍に1/2インチコンデンサーマイクを設置し、DATレコーダーに振動加速度と音圧を同時録音した。

以上の実測値より、次式で定義される放射効率係数 $\sigma$ を算出した。

$$\sigma = \frac{\int_0^T p(t) \cdot v(t) dt}{\rho c \int_0^T v(t)^2 dt} \quad (1)$$

$c$ : 放射効率

$p(t)$ : 音圧(Pa)

$v(t)$ : 振動速度(m/sec)

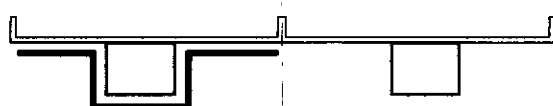
$\rho c$ : 空気の音響インピーダンス

$T$ : 測定時間(秒)

### (3) 放射音の音響インテンシティー

高架構造物音のパワーレベルを把握するために、構造物から外部に放射される音の強さ(音響インテンシティー)を図-3に示す面で測定した。使用される音響インテンシティー計は、特定の方向のみの音の強さが可能である。スキミングして得られた測定面を通過する音響インテンシティーレベルは、人間の音波の感じ方に合わせた補正(A特性補正)を施した後に、単位面積当たりの値に変換されている。

(鋼箱桁)



(鋼I桁)

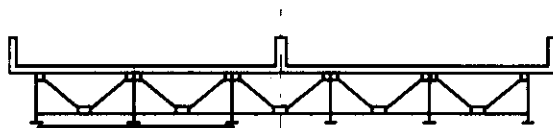


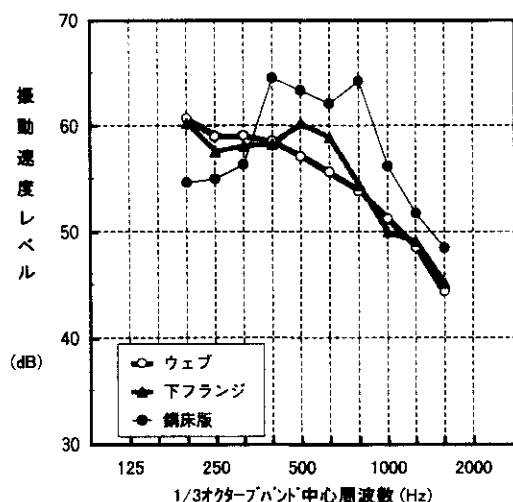
図-3 音響インテンシティーの測定範囲(太線部分)

## 3. 測定及び解析結果

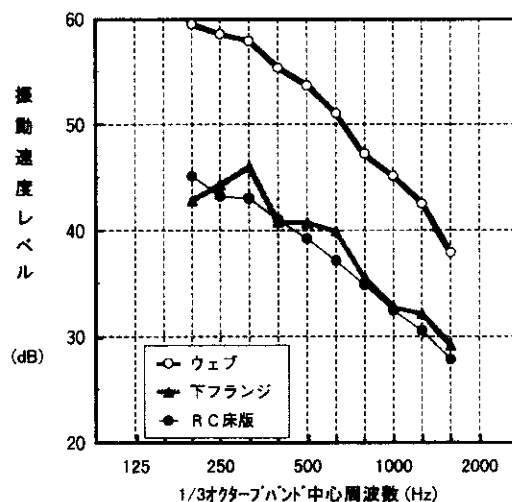
### 3-1 構造物の振動速度

部位別の振動速度のエネルギー平均値をレベル表示し、1/3オクターブバンドの中心周波数で整理したものを図-4に示す。鋼床版鋼箱桁では、鋼床版の振動がもっとも大きく、主桁ウェブとフランジがほぼ同じである。鋼床版鋼I桁では、鋼床版の振動がもっとも大きく、次いでウェブ、フランジの順である。RC床版鋼I桁ではウェブの振動がもっとも大きく、フランジや床版の振動はウェブに比べ10dB以上小さい。軽量コンクリート床版鋼箱桁でもこれと同じ傾向である。

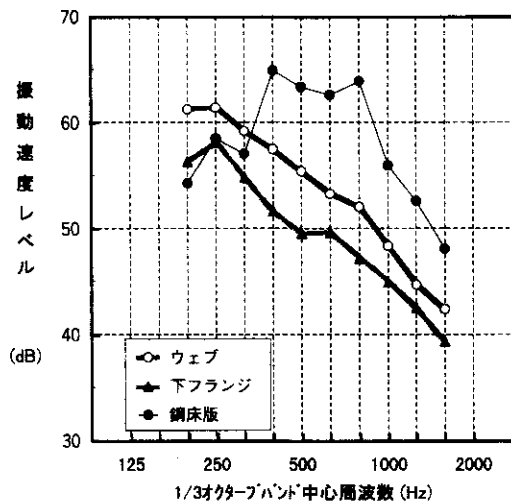
〔鋼床版鋼箱桁〕



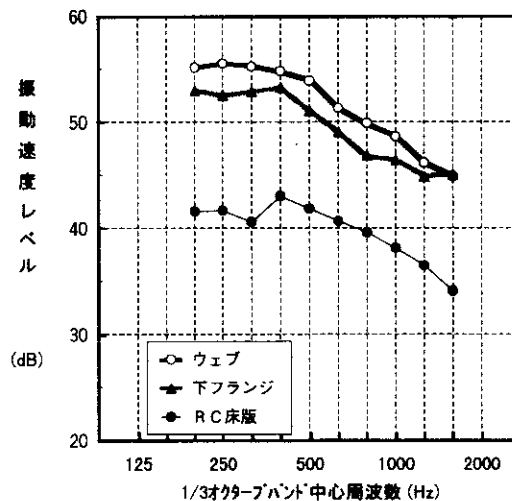
〔RC床版鋼I桁〕



〔鋼床版鋼I桁〕



〔軽量コンクリート床版鋼箱桁〕

図-4 部位別の振動速度 (エネルギー平均値) [O (dB-5.0×10<sup>-8</sup>m/sec.)]

この結果により、振動速度が大きいのは、鋼床版や面積の大きい鋼桁ウェブや箱桁の下フランジであり、コンクリート系床版や面積が小さい鋼I桁下フランジの振動は比較的小さいことがわかる。

鋼床版の測定結果は、他の部位やコンクリート系床版と比べて、周波数特性に異なる傾向を示している。鋼床版の全ての測定点での値を重ね書きしてみると(図-5)、アスファルトで拘束されている床版裏面(A)に比べ、拘束されていない鋼リブ部分(B, C)での振動が大きく、鋼床版全体と同じく、400~800 Hzが卓越した特徴的な周波数特性となっている。従って、鋼床版全体の高

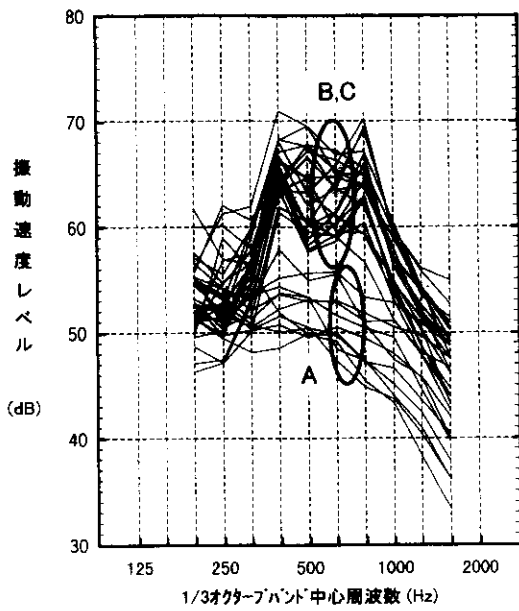
架構造物音は鋼リブの振動の寄与が大きいと考えられる。

### 3-2 振動の音響放射効率

放射効率係数をレベル表示し、複数点の算術平均したものを、1/3オクターブバンド中心周波数でまとめ図-6に示す。これにより、振動が音波に変換される際のエネルギー損失量がdB単位で表される。

鋼床版鋼箱桁のウェブとフランジの測定値に大きな差はなく、低い周波数ほど低下する傾向にある。RC床版鋼I桁の床版においては、放射効率は全周波数に渡って良好である。一方、鋼I桁では鋼箱桁と同様に低い周波数ほど放射効率が低下

〔鋼床版鋼箱桁〕



〔鋼床版鋼I桁〕

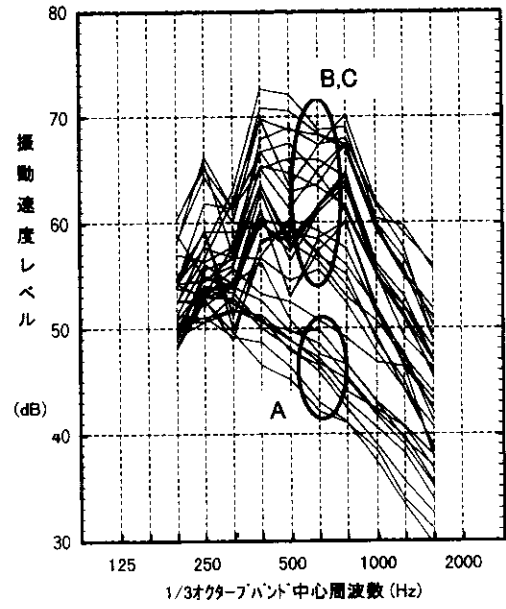
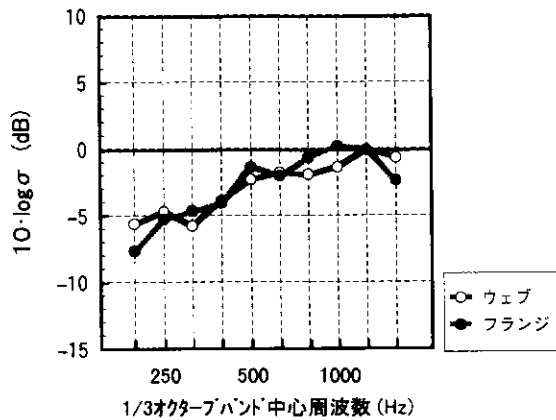
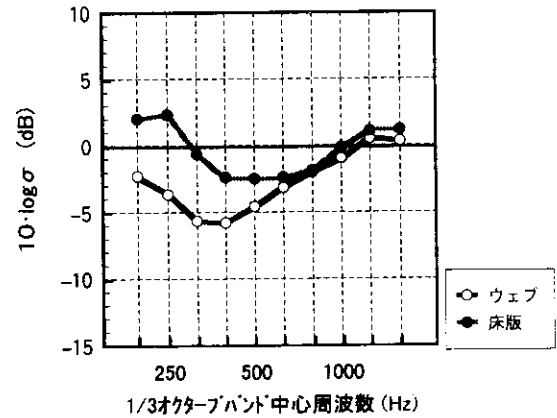


図-5 鋼床版の振動速度 [O (dB=5.0×10<sup>-8</sup>m/sec.)]

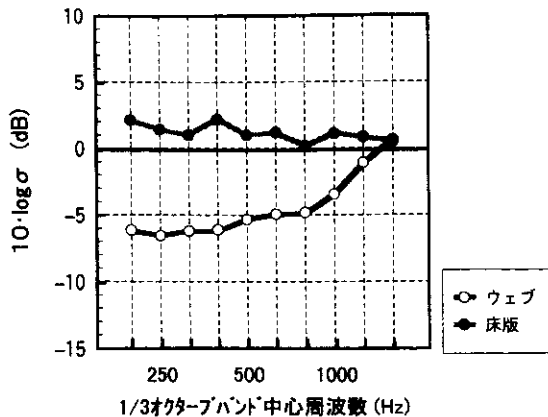
〔鋼床版鋼箱桁〕



〔鋼床版鋼I桁〕



〔RC床版鋼I桁〕



〔軽量コンクリート床版鋼箱桁〕

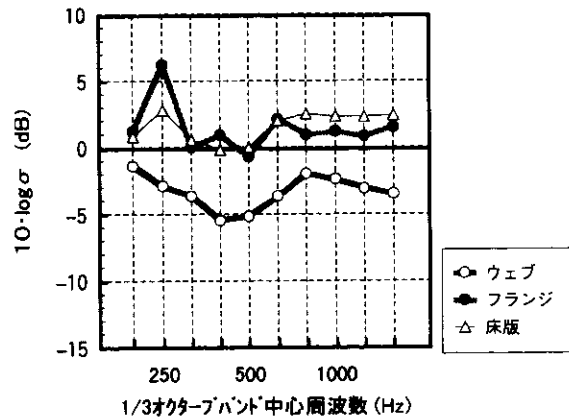


図-6 振動の音響放射効率レベル

する傾向を示している。軽量コンクリート床版鋼箱桁のウェブの測定値は-5~-1 dB程度、フランジのそれは0~+6 dB程度である。また、床版の測定値、計算値共0~+3 dBの範囲に納まっている。鋼床版I桁のウェブの測定値は315~400 Hz帯域の放射効率レベルが小さくなっている。

全般に、鋼桁については-5~0 dB程度の変換効率である。これは、主桁の裏面には補強部材等の部材が多く取り付けられているため、凹凸が多く、放射性に影響を受けやすいためと考えられる。一方、コンクリート系の床版では、その平坦性から振動速度のほぼ100%が音波に変換されている。

### 3-3 放射音の音響インテンシティ

A特性補正後の単位面積当たりの音響インテンシティレベルを表-2に、各部材の面積を考慮し、高架道路の地面への投影面積で基準化した音

響インテンシティレベルを図-7に示す。交通量が調査場所により若干異なるが、全体の傾向としては鋼床版に比べコンクリート床版の方のレベルが小さいことがわかる。

音響インテンシティの測定値と、次式により求めた桁から放射される音の推定値を比較した(図-8)

$$AI = \sigma \rho c v^2 \quad (2)$$

AI: 音響インテンシティ (watt/m<sup>2</sup>)

c: 放射効率

v: 振動速度 (m/sec)

$\rho c$ : 空気の音響インピーダンス

なお、I桁については、桁間を通過する音響インテンシティを測定しているため、部位毎の放射

表-2 音響インテンシティの測定結果

調査場所	測定面	A特性補正音響インテンシティレベル(dB(A)/m <sup>2</sup> )										
		A.P.	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600
① 鋼床版鋼箱桁	床版	62	49	48	47	52	54	54	56	51	49	47
	ウェブ	59	49	47	49	49	51	50	51	9	49	43
	フランジ	61	48	48	48	52	54	54	53	50	49	45
② RC床版鋼I桁	桁間	57	41	44	47	48	49	50	48	46	45	42
③ 軽コン床版鋼箱桁	床版	55	43	43	44	45	46	47	48	47	45	43
	ウェブ	59	47	48	49	49	50	51	52	49	47	45
	フランジ	59	47	49	49	49	49	51	52	50	49	45
④ 鋼床版鋼I桁	桁間	65	49	52	53	56	57	57	58	57	56	53

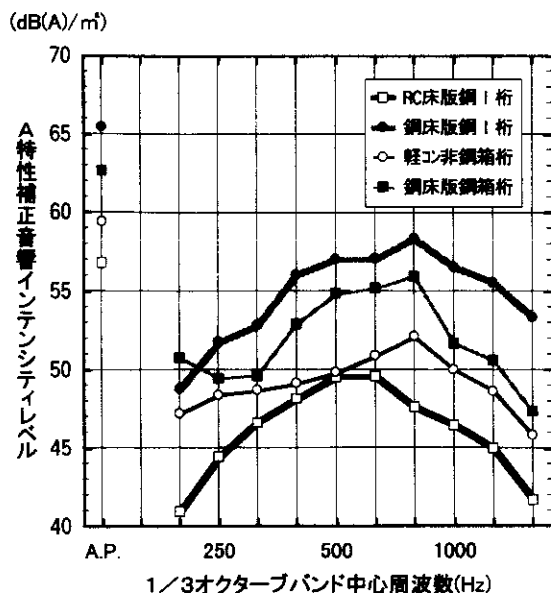


図-7 単位橋面積当たりの音響インテンシティ

I桁については、測定値  
箱桁については、部材毎の音響インテンシティの測定値に部材の表面積を考慮し、投影橋面積1 m<sup>2</sup>当たりの値に換算

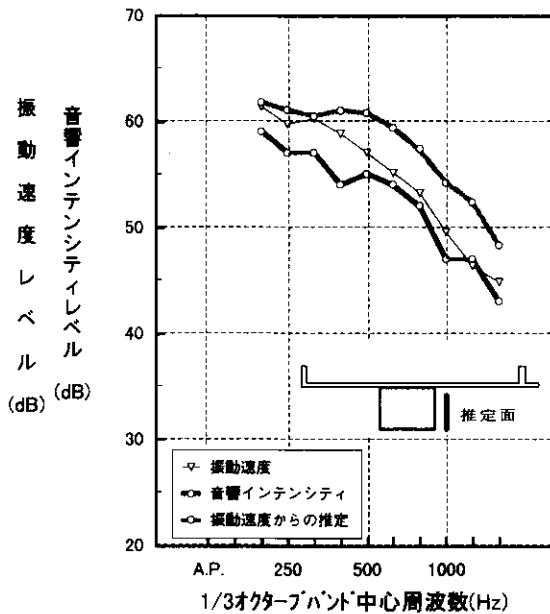
音の推定値に部位の面積を考慮し、桁間面積で1 m<sup>2</sup>あたりに換算した推定値としている。

これによると、鋼床版鋼箱桁とRC床版鋼I桁では、推定値と測定値はよく似た傾向を示しているが、いずれも推定値の方が測定値よりも全周波数に渡って0~7 dB程度大きくなっている。これ

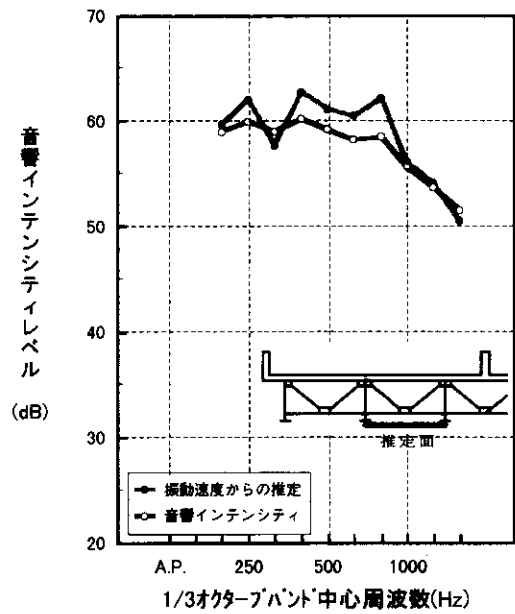
は、放射効率の測定は振動面のごく近傍（振動面から約1 mm）で行ったが、振動面の近接した部分の間でエネルギーのやりとりが生じることにより、実際には放射効率の測定値ほど効率がよくなかったためと考えられる。

軽量コンクリート床版鋼箱桁では、低い周波数

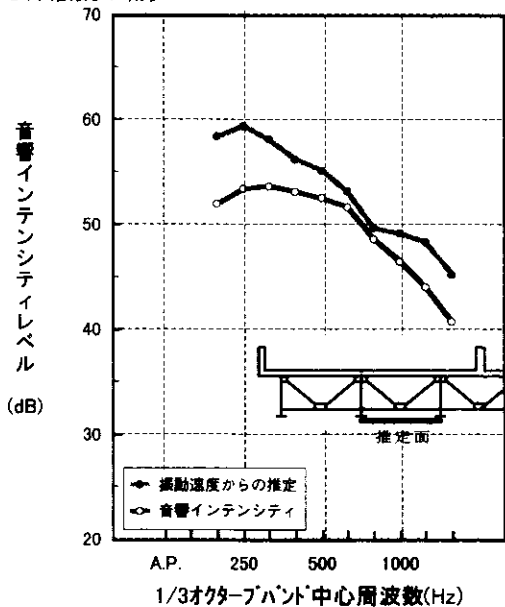
〔鋼床版鋼箱桁〕



〔鋼床版鋼I桁〕



〔RC床版鋼I桁〕



〔軽量コンクリート床版鋼箱桁〕

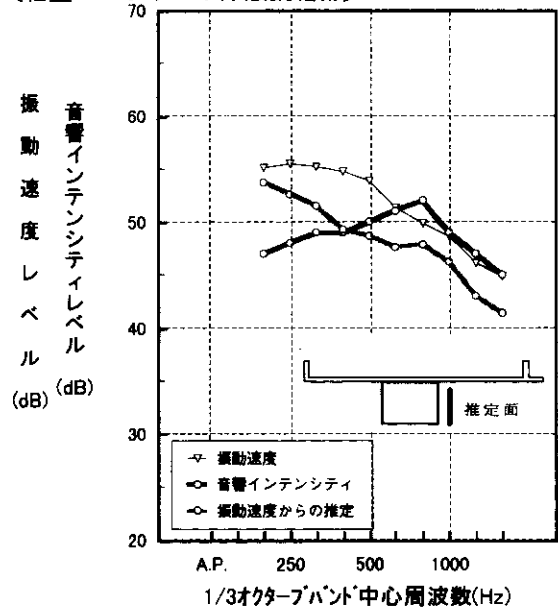


図-8 振動放射音の測定値と推定値の比較

では推定値が測定値よりも大きい、高い周波数では逆の結果になっている。鋼床版鋼I桁では、推定値は測定値と同じか3dB程度大きい、傾向は比較的良好一致している。

音響インテンシティの測定値は、各部材の振動速度と放射効率および放射面積を考慮した推定値と相対的によく似た傾向にあった。放射効率については-5~0dBの値であり、部材の違いによる差は小さい。従って、高架構造物音では、振動速度が大きく、放射面積が大きい部位の寄与が大きくなり、鋼I桁のウェブや鋼箱桁、鋼床版などが主たる発生源と考えられる。

#### 4. 高架構造物音の予測

##### 4-1 床版下 $L_{Aeq}$ と交通量・速度との関係

高架道路の床版下(高架裏面吸音板上1.2m)で終日、等価騒音レベル( $L_{Aeq}$ )の測定を行い、毎時10分間の $L_{Aeq}$ と高架道路1車線当たりの車種別交通量および平均走行速度の関係について次式を仮定し、重回帰分析を行った。

$$L_{Aeq} = A \cdot \log_{10} Q_1 - B \cdot \log_{10} Q_2 - C \cdot \log_{10} V - D \quad (3)$$

$Q_1, Q_2$ : 小型車類及び大型車類交通量  
(台/時/車線)

$V$ : 速度(km/h),  $A, B, C, D$ : 重回帰係数

測定時の交通量等の諸元を表-3に、分析により得られた係数を表-4に示す。大型車係数 $B$ は7~11で道路構造による差は小さい。小型車係数 $A$ は $B$ に比べ小さく、重回帰分析で棄却され算出できない場合もあった。速度係数 $C$ は10~37で道路により大きく異なっている。

以上のことから、大型車混入率が極端に小さい場合を除けば、高架構造物音の影響は大型車交通量に依存していると考えられる。また、速度に依存する傾向もみられるが、係数 $C$ のばらつきが大きかった。

表-3 騒音測定時の交通流に関する諸元

交通量等の項目	最小~最大
交通量(台/時/車線)	300~1500
大型車(台/時/車線)	150~400
平均走行速度(km/h)	60~90

表-4.  $L_{Aeq}$ と交通量・速度との関係

係数	高 架 構 造				
	鋼床版 鋼箱桁	鋼床版 鋼I桁	RC床版 鋼I桁	軽コン床版 鋼箱桁	
$A$	不明	1.53	0.66	不明	
$B$	7.34	8.02	8.87	11.19	
$C$	36.82	28.88	9.88	16.61	
$D$	-8.62	-12.6	19.08	6.50	
平均 値	$Q_1$	775.5	744.0	775.5	672.5
	$Q_2$	265.2	271.3	265.2	205.8
	$V$	71	68	71	79

注)。「不明」: 重回帰分析で棄却されたことを示す。

「平均値」: 日平均値

##### 4-2 音響パワーレベルの設定式の検討

高架構造物音に小型車はほとんど寄与しないことは、過去の研究でも確認されている<sup>5)</sup>。しかし、大型車が極端に少ない交通形態の場合には小型車の影響が無視できないため、一般的な高架構造物音の音響パワーレベル $L_{WA, str}$ の設定式としては次式を仮定した。

$$L_{WA, str} = 10 \cdot \log_{10} (Q_1 - a \cdot Q_2) - b \cdot \log_{10} V - c \quad (4)$$

$L_{WA, str}$ : 高架構造物音の単位橋面積当たりの時間平均音響パワーレベル  
(dB(A)/m<sup>2</sup>)

式(4)では、別の高架道路(RC床版鋼箱桁)の床版下で測定した大型車と小型車のピークの差が、9~10dBであることから、 $a=10$ とした。速度依存性については、 $L_{Aeq}$ と速度の対数値とが10~37倍の関係であり橋梁により回帰係数のばらつきが大きいため、回帰係数の平均値を用い、音響パワーレベルは速度の対数値の20倍に比例



すると仮定し、 $b=20$ とした。

以上より、高架構造物音の単位橋面積当たりの平均音響パワーレベル算定式を設定した。

$$L_{WA, str} = 10 \cdot \log_{10} (Q_1 - a \cdot Q_2) - 20 \cdot \log_{10} V - c \quad (5)$$

式(5)の交通量及び走行速度への依存の妥当性を検討するために、 $L_{Aeq}$ が $L_{WA, str}$ に比例すると考えてと交通量等との関係式を次のように設定した。

$$L_{Aeq} = 10 \cdot \log_{10} (Q_1 - 10 \cdot Q_2) - 20 \cdot \log_{10} V - c' \quad (6)$$

$c'$  は定数。

$c' = 0$ とおき、床版下での騒音測定時の交通量及び走行速度を式(6)に代入し、 $L_{Aeq}$ の暫定推定値を求めた。 $L_{Aeq}$ の測定値と暫定推定値との対応を図-9に示す。相関係数は、鋼床版鋼箱桁を除けば0.7~0.75であり、式(6)の設定はほぼ満足できる。

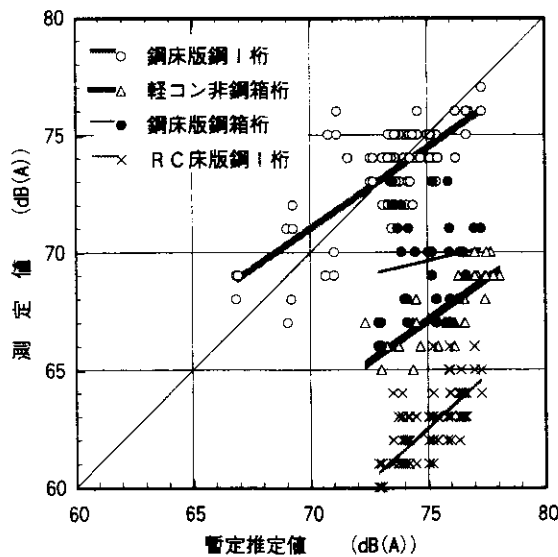


図-9 パワーレベル設定式の妥当性の検討

次に、式(5)の定数項 $c$ の算出手順を示す。

- ① 鋼I桁については桁間での音響インテンシティの測定値を $L_{WA, str}$ とする。
- ② 鋼箱桁については4車線幅員(幅20.25m)で2本桁を想定し、床版部分が14.25m、下フラ

ンジの幅が6m(3m×2本)、ウェブの幅が10m(2.5m×2面×2本)とし、各面の音響インテンシティの測定値に面積の重み付けをして、高架道路幅員で基準化し $L_{WA, str}$ とする。

- ③ 各 $L_{WA, str}$ と音響インテンシティの測定時の車種別交通量・速度を式(5)に代入し、係数 $c$ を算出する。

係数 $c$ の算出結果を表-5に示す。同じ床版形式ではほぼ同じ値となる。予測モデルの使いやすさを考慮すると、鋼床版で $c=-8$ 、コンクリート床版で $c=-15$ としても十分と考えられる。

表-5. パワーレベル設置式の係数 $c$

道路構造		パワーレベル設置式の係数 $c$	
床版	桁	算出した値	設定した値
鋼床版	鋼箱桁	9.7	-8
	鋼I桁	-7.1	
コンクリート	鋼I桁	-15.5	-15
	鋼箱桁	15.0	

#### 4-3 高架構造物音の周波数特性

音響インテンシティの測定値から求めた、高架構造物音の周波数特性を図-10に示す。値はオールパスの音圧レベルを基準とした相対値として示している。これによると、A特性補正後の周波数特性は630~800Hzに卓越した成分を有していることがわかる。また、相対的な傾向には道路構造での違いはみられない。従って、構造種別に関係なく、式(7)に示す関数近似式により音圧レベルの周波数特性は表現できる。図-10には近似式による値にA特性補正した値もあわせて示しており、実測値との相関は高いことがわかる。

$$\Delta L_{str}(f) = -10 \cdot \log_{10} \left\{ 1 + \left( \frac{f}{760} \right)^{3.3} \right\} \quad (7)$$

ここで、 $f$ : 周波数(Hz)

$\Delta L_{str}(f)$ : 高架構造物音の相対音圧レベル(dB) (注、A特性補正する前の値)

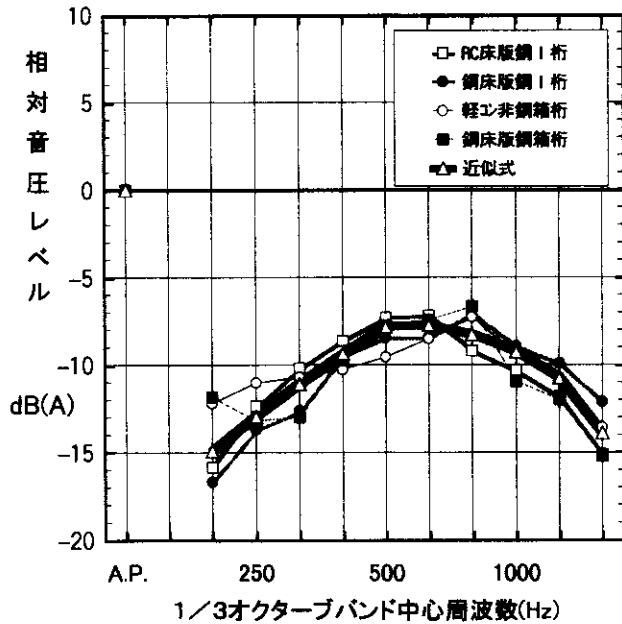


図-10 高架構造物音の周波数特性

## 6. まとめ

高架構造物の振動速度、音響放射効率及び構造物近傍の音響インテンシティの測定結果から、主に面積の大きい鋼材（鋼床版、鋼主桁）から放射される高架構造物音が大きいことがわかった。続いて、大型車、小型車交通量及び走行速度を要素とした高架構造物音のパワーレベルの予測式を検討した。これによると、音響パワーレベルは床版の種類により分類でき、鋼床版とコンクリート系床版の差は約7 dBであった。また周波数特性には構造種別による明確な違いはみられず、一つの推定式で表現できることがわかった。

今後、今回の対象外であったコンクリート桁の実態調査を行い、データ数を増やすとともに、今回の結果も含めて予測モデルの精度向上を行う予定である。

なお、本研究は阪神高速道路騒音対策検討委員会（委員長：前川純一神戸大学名誉教授）において審議いただき、たくさんの貴重な意見をいただいた。委員長をはじめ委員会の各位に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会, "道路交通騒音の予測モデル"ASJ Model 1998"-日本音響学会道路交通騒音調査研究委員会報告-, "日本音響学会誌55(4), pp.281-324(1999).
- 2) 森喜仁, 富田稔, "高架裏面反射音の予測モデル," 技報 (第十七号), 阪神高速道路公団監修, pp.11-19(1999.7).
- 3) 北村泰寿, 藤原申次, "鋼桁に発生する高次振動の境界要素法解析," 土木学会第50回年次学術講演会論文集, (1995.9).
- 4) 日高新人, 矢野博夫, 橋秀樹, "高架道路床版からの音響放射パワーの測定," 日本音響学会研究発表会講演論文集, pp.533-534(1991.3).
- 5) 田近輝俊, 飯森英哲, 渡久地政樹, 上坂克巳, 山本貢平, 橋秀樹, "高架構造物音の予測方法に関する検討," 日本音響学会騒音・振動研究会資料, N-99-16 (1999.3).
- 6) 福島昭則, 一木智之, 森喜仁, "高架道路から放射される構造物音の調査結果," 日本音響学会騒音・振動研究会資料, N-99-49(1999.7).