

鉄道騒音

東大 正会員 松本壽司

大工大 正会員 渡辺義則

東大 学生員 角 知憲

1. はじめに

鉄道騒音の実態を把握するため、東京都営地下鉄6号線の高架区間を対象にして、騒音と軌道振動の測定を行ってきた。ここでは、鉄道騒音の代表的ケースとしてコンクリート高架橋・バラスト道床区間と、騒音レベルの著しく高いケースとして鋼橋部(有道床)とについての測定結果を示し、騒音発生機構についての考察を述べることにする。

2. コンクリート高架橋の騒音について

(1) 高架橋各所に生じる騒音の性質

25mごとにレール継目をもつ直線の砂利道床区間を約50km/hで走行する列車から発生する騒音について、高架橋の各場所(図1)ごとに、聴感に近いといわれるA特性で測定すると、継目部では図2のように、 $\frac{1}{3}$ オクターブ中心周波数($f_{c\frac{1}{3}}$)=400Hz~1kHzの中間波成分が優勢になる。(中間部では500Hz及び1kHz)これらの成分が騒音レベル(dBA)を決定するものであり、一番“やかましく”聞こえるものと考えられる。本節ではこの領域の成分を発生する音源の性質について、軌道構造及び列車速度の両側面から検討する。

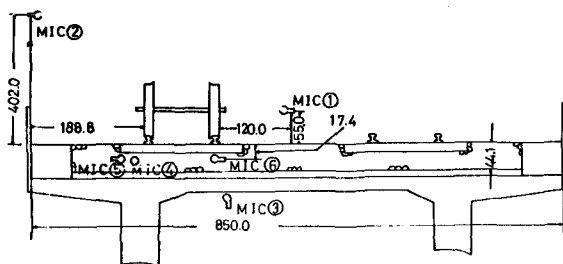


図1 都営6号線騒音測定位置概略図

△ MIC ① × MIC ③ ○ MIC ⑤
▲ MIC ② ○ MIC ④ ● MIC ⑥

(2) 軌道構造と騒音

軌道の振動特性と騒音の関連を調べるため、軌道振動を理論的に考察すれば、中間波領域の振動をより低い周波数領域に移動させるためには、枕木の質量を増し、枕木下を弾性的にすればよいことが推論できる。そこで、50mの区間にわたって枕木の下に約30%のゴムを入れ、レールヘッドも30%のものに取替えて軌道を改造した(図3)。実験の結果、継目部、中間部とも軌道の振動特性は最初意図したように変化し、それは騒音に次の影響を与えることが判った(図4)。

① 継目部では $f_{c\frac{1}{3}} = 160 \sim 200\text{Hz}$ の成分が $f_{c\frac{1}{3}} = 500\text{Hz}$ よりも優勢になる。

② 一方、中間部ではMic ①(軌道上)、Mic ④~⑥においては $f_{c\frac{1}{3}} = 500\text{Hz}$ が依然優勢であるが、Mic ③(高架上4m)とMic ⑤(高架下)では $f_{c\frac{1}{3}} = 160 \sim 200\text{Hz}$ が $f_{c\frac{1}{3}} = 500\text{Hz}$ よりも優勢になる。

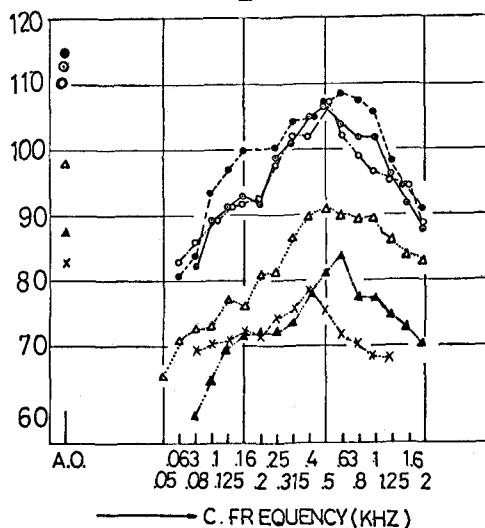


図2 $\frac{1}{3}$ オクターブ周波数分析結果
(在来軌道、継目部)

=500Hzと同じ程度のレベルになる。 このように改造した弾性軌道では高架上の各位置および高架下における騒音の性質が大きく変化した。聞こえてくる音の性質が異なってくるということが認められた。

また、在来軌道と改造した弾性軌道で測定したMic①,②の騒音をフィルターで濾波し、 $f_{c3}=500\text{Hz}$ バンドの波形を比較すると、このバンドの音は数個の異なった音源から発生した騒音から構成される複合音であるが、そのなかでも継目部では軌道構造に關係の深い衝撃音が、中間部では軌道構造に無關係に主たる定常的な音がそれぞれ優勢であり、高架各所の騒音(A特性)は、おもにこの2つの音が伝播した結果であると考えられる。

軌道の改造によって、継目部では最初の意図どおり $f_{c3}=500\text{Hz}$ 付近の成分を、 $f_{c3}=160\sim 200\text{Hz}$ 付近に移動させることができたが、予想外にこのレベルが大きくなった。そのために、高架下の騒音(Mic③)以外では騒音レベルは下らなかつたが、軌道構造によって発生する騒音を、ある程度制御する可能性は示されたと考えられる。

6) 列車速度と騒音

中間部で、軌道改造後も依然騒音レベルを決定する $f_{c3}=500\text{Hz}$ の成分に対しては、異なった観点からの検討が必要である。この $f_{c3}=500\text{Hz}$ の定常的な音の性質を解明するために、列車速度を変えて車外(高架軌道上)及び車内の騒音を測定した。その結果、車内、車外の両騒音ともその卓越周波数は列車速度に正確に比例することが認められた(図5)。このような性質を持つ音源としては主動力装置(主電動機、ギヤ)が考えられ、主電動機単体の定置試験などからも、ここから発生する騒音が主体となって車内、および車外に伝播している可能性が強いと思われる。

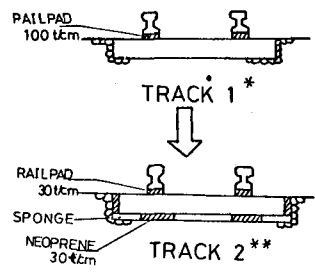


図3 弾性軌道への改造

(2) 車両近傍の騒音の発生

将来、効果的な防音対策の手段を開発する必要があるとすれば、まず、騒音発生メカニズムを解明することが必要であり、そのためには騒音の発生点を明確にすることが必要である。都営6号線高架区間では発生する騒音が異なった性質をいくつかの成分に大別できることは前述したとおりであるが、このうち、軌道構造に關係する成分を音源によってさらに分解することを試みた。

音の発生が面体表面の振動速度に依存することは、初等的な音響学の教えるところである。そこで、次のような方針で想定した音源からの発生する音を抽出することにした。

① 想定音源の振動を測定する。

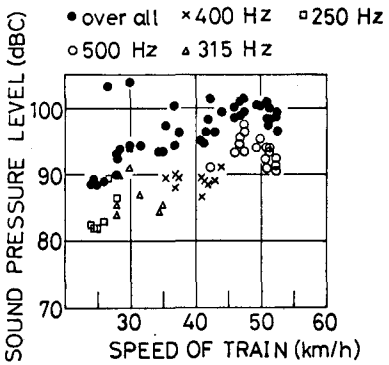


図5 列車速度と卓越周波数

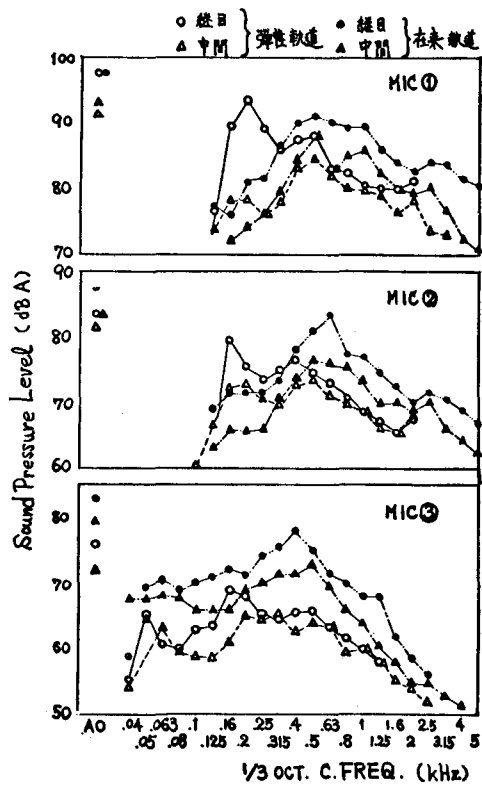


図4 在来軌道と改造した弾性軌道との騒音の比較

② 想定音源の至近距離にマイクを設置する。

③ 振動データから、音源の発生する音を理論的に計算し、至近距離での騒音データと対比して実際に発生している音を確認する。

④ 妥当な音源モデルを仮定して、Mic①の位置での音圧に換算し、実験データと比較してその音源の相対的大きさを判断する。

測定は便宜上、軌道側、車両側に分け、軌道側については前記の都営6号線を、車両側は同線志村車両基地内の試運転線を使用した。

① 軌道側音源

軌道側音源としては、レール、枕木を考慮し、レールの上下、水平方向振動、枕木の上下方向振動を測定してレール側方30cmの騒音と比較したところ、継目部においてはある程度の一致をみた。そこで、レール、枕木を音源としてMic①に換算したのが図6、7である。

これより、音源としての軌道の寄与は、継目部の低周波成分(200Hz以下)を除いて、あまり大きくないことが推定される。なお、図6で、低周波領域で計算値が著しく過大となるのは枕木の放射率を1としたためである。図7では、中間部騒音は前述のように車両に原因があると考えられる成分が優勢であり、レール側方30cmでの観測データがおおむね車両からの音と考えられるスペクトルを示したため、計算値のみを掲げた。

② 車両側音源

車両側音源として、中間部では主動機装置の発生する音が無視できないことは前述のとおりであるが、そのほか、特に継目部では車輪、軸箱など、ボギー構成品が音源となることが予想される。車輪以外のものには加速度計を設置できるが、車輪の振動計測は困難であるので、マイクを至近距離(軸箱下面)に設置しマイク設置面の振動測定を併用して、車輪が発生する音を検出しようとした。

図8に車両近傍の騒音の実測結果を示す。ボギー構成品のうち、軸箱、側梁などの振動は問題にならないことが推定できるので、車輪を音源と仮定し、車輪の至近距離の騒音(軸箱下)からMic①への換算を行った結果をも併せて示してある。これにより、車両側音源にMic①の騒音レベルに見合うものがあることがわかる。しかし、車両側には軸箱下よりレベルの高い測定点が存在し、この音の起源と軸箱下騒音の関係が明らかでないため、車輪からの音を推定するにはまだ問題点が残されている。

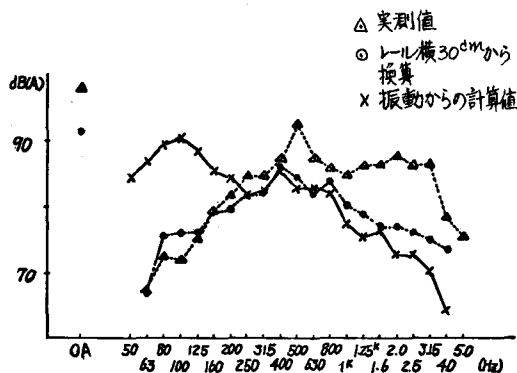


図6 MIC①に対する軌道側音源の寄与(継目部)

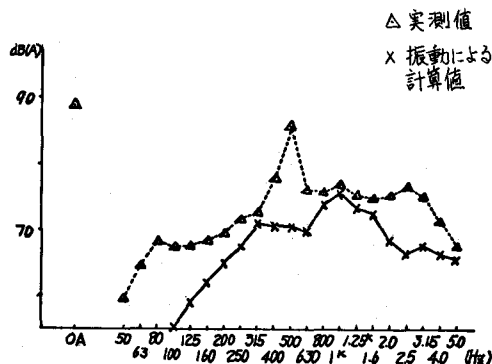


図7 MIC①に対する軌道側音源の寄与(中間部)

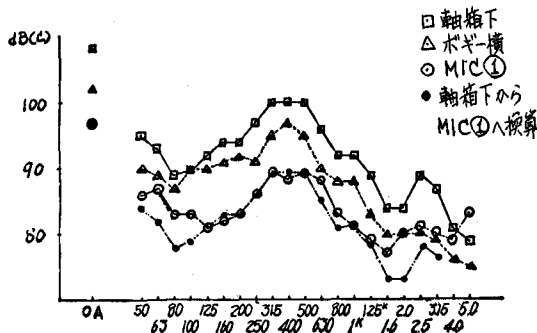


図8 車両近傍の騒音

(3) 騒音伝播の予測

① シミュレーション・モデル

いままでの実験結果をもとに、高架上各所の騒音の予測に次のモデルを提案する(図9)。

- ① レール継目衝撃音は各レール継目の位置に固定された点音源から、車輪が通過するごとに発生する。
- ② 主に主動式装置から発生すると推定される音は、各ボードの位置にあって、列車とともに移動する点音源から発生する。

さらに、高架側方の各所に伝播する騒音の予測には、このモデルを次のように拡張する。

- ① 前述の軌道上の音源に加えて、高架下面に、レール継目および中間部において列車通過に起因して生じる2種の面体音を考える。
- ② これら4種の音源から生じた音が、高架橋側壁あるいは高架橋自身に遮音されるが、直接あるいは地面を反射して高架側方各所に伝播する(図10)。

この4種の音源のレベルは、それぞれ継目音は在来軌道の継目衝撃音から、ボードに伴う音は中間部騒音を列車・高架近傍で測定したデータから求める。

② 都営地下鉄6号線の予測結果ならびに考察

高架上各所の騒音レベルは、前記のモデルによって比較的正確に予想することができる。図11はこれを用いて都営6号線の高架側方の騒音マップを予測してみたものである。ここでは比較のための図中に実測値も示してある。

さらに、この予測モデルを詳しく考察すると次のことがわかる。高架上の騒音は、

- ① レールの継目部から約8m以内ではレール継目衝撃音が、中間部のレールから約2m以内では主に主動式装置から生じると推定される音が、各々圧倒的に優勢である。
- ② それ以上の遠方では両音源とも鉄道騒音に影響を及ぼす。
- ③ 一方、高架側方の騒音では、
- ① 騒音が70dBAを越えるのは

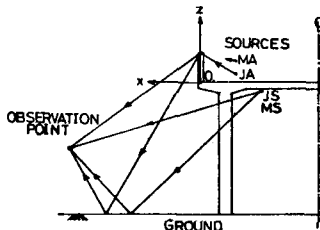


図10 高架側方の音の伝播

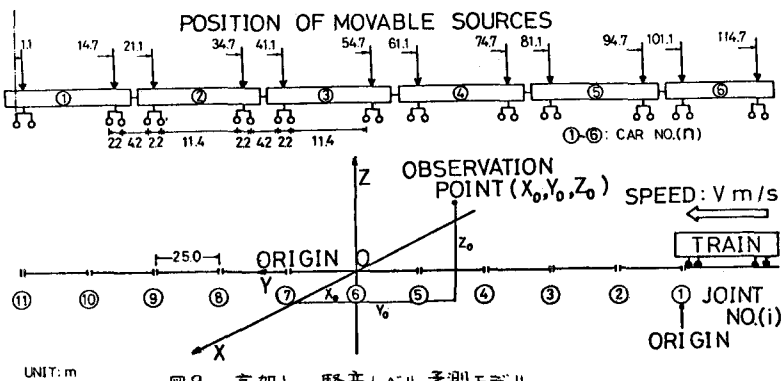


図9 高架上の騒音レベル予測モデル

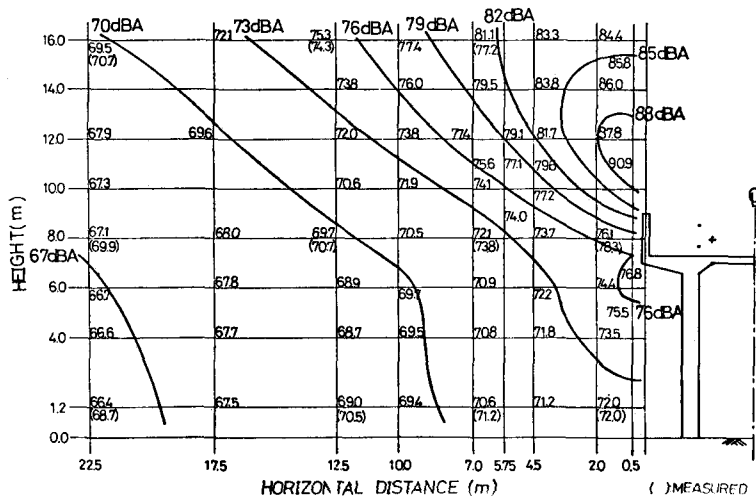


図11 高架側方の騒音レベルマップ(継目部断面位置)

側壁から約10m以内である。この部分でも特に地面から高さ10m以上では、高架上の騒音が遮音されるので、騒音レベルがかなり大きくなる。

② 前述の4種の音源の騒音に及ぼす影響は複雑であって、それは地面からの高さ、側壁からの水平距離および継目部との位置関係によって異なる。

C) 国鉄信越本線下碓氷川橋梁での予測結果ならびに考察

この予測方法の実用性を検討するため、都営6号線以外の鉄道橋に同様の測定と計算を行ってみた。対象として選んだのは国鉄・下碓氷川橋で、遮音壁を組み込んだような形式のPC下路橋(スパン27m, 桁高さ2m)である(図12)。同橋は明治道床の直線区間で、列車速度は約80km/hである。

都営6号線の列車速度約50km/hに比べると高速であり、実測においても1.25kHz

以上の高周波成分が大きく、音源としてパンタグラフを追加する必要が認められた。

そこで、都営6号線の軌道上騒音(Mic①)・高架下騒音(Mic④)に相当する

点のほか、図12のP1点を測定して、パンタグラフのパワーレベルを

推定した。これにより、橋梁周辺の騒音を予測したところ、ほぼ等しい

結果を得た。一例として、P2点における予測値と実測値の比較を示す

(図13)。なお、同橋では、タイヤフラットなどによる異常な音の影響

も大きく、さらに、この点を考慮したモデルが必要になるものと考えられる。

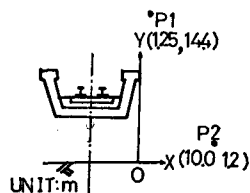


図-12 下碓氷川橋と騒音測定点の概略

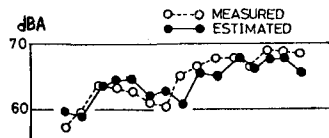


図-13 P2点における予測値と実測値

3. 鋼橋の騒音について

(1) 騒音の発生

列車が鋼橋を通過する際には、橋梁の構造そのものが振動し、音を放射すると言われている。そこで、この種の騒音発生機構を研究するため、都営6号線蓮根オセ架道橋において、鋼板の振動と橋梁近傍、並びに地上における騒音を同時測定した。同橋は有道床、下路アレートガーダー橋で、列車速度は約50km/h、北行軌道はスパン中央に継目がある。同橋における測定の概要を図14に示す。

測定した振動・騒音データは、FFT周波数分析を行い、その卓越周波数を比較したところ、両者はおおむね良く一致した。また、橋梁構造を打撃し、その際の振動を同様に比べたところ、列車走行時の振動の卓越周波数の一部と一致した(図15)。これから、橋梁付近(レールレベル以下)で観測された騒音は橋梁構造の振動に起因し、その一部は構造の固有振動であることがわかる。しかし、地上における騒音の主要なパワーを占める130Hzの成分

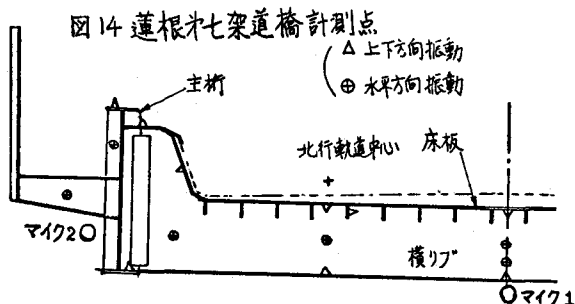


図14 蓮根オセ架道橋計測点

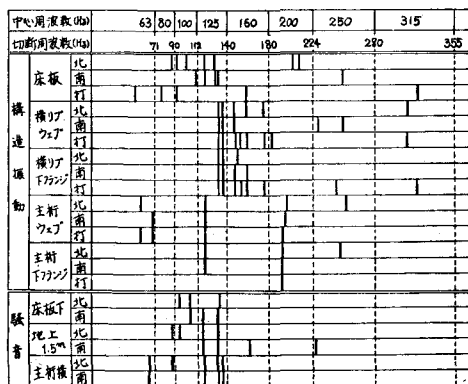


図15 構造振動・騒音卓越周波数対照表

北: 北行列車
南: 南行列車
打: 打撃振動試験

(このほかマイク①の下方4.3m(地上1.5m)にマイクを3を計った。)

は、床板の振動に依存すると考えられるが、これは床板の固有振動ではなく、他のメカニズムによる可能性がある。また、振動速度と音圧とは量的には余り一致せず、多重反射など、何らかの音響的效果が介在すると考えられる。なお、振動、騒音ともFFT分析結果は明確なピークを示した。

(2) 騒音の伝播とバラストマットの効果

音響パワーの点で最も主要な成分である130Hzの成分について(これが、地上の騒音レベルのほとんどを支配する。)、橋梁下面での騒音データと主桁ウェブの振動データを用い、橋の下の道路は音を完全に反射すると仮定し、さらに適当な補正項(-5dB)を導入して、バラストマットの施工の前後における橋梁から地上への音の伝播を計算し、ほぼ実測に近い結果を得ることができた(表1)。この補正項は、前記の仮定のほか、橋梁下面、主桁の音響出力の空間的分布などによると考えられる。

バラストマットの敷設により、床板の振動が半減し(表2)、これに対応して橋梁下面の音響出力が約7dB減少することが実測で確かめられたが、上の計算はバラストマットの効果は床板以外の構造部材には及ばず、その点を限界があることを示している。なお、継目衝撃に伴うインパルス音には、前記計算のらぬものがあり、さらに検討中であることを付記しておく。

表1 橋梁下面から地上への騒音伝播の計算

	音源	音響出力	直接音	反射音	補正	Total	実測
施工前	床板	107 dB_m	103 dB	100 dB	-5 dB	101 dB	100 dB
	主桁	110 dB_m	98 dB	95 dB	-5 dB	101 dB	100 dB
施工後	床板	100 dB_m	96 dB	93 dB	-5 dB	96 dB	97 dB
	主桁	109 dB_m	96 dB	94 dB	-5 dB	96 dB	97 dB

表2

構造部材振動
(各部材中央部)

部 材	加 速 度		施 工 前		施 工 後	
	北	南	北	南	北	南
床 板	G	G	G	G	G	G
	1.30	0.82	0.64	0.40		
横リブウェブ	1.46	1.68	1.43	1.85		
主桁ウェブ	2.35	1.43	1.59	0.88		

4. 補遺

鉄道騒音のように、非定常的騒音で衝撃的成分を含み、データの再現性が保証されないものの測定・分析・評価の方法については様々に議論されることである。近年、多く設けられている各種の騒音規制は、測定器の仕様や読み取り方法を定めているが、ここに述べた研究は物理的な騒音の発生・伝播機構に焦点を絞っているので、独自の測定・評価の方法を用いている。

まず、都営6号線は全列車とも同型車で、保守状態も良好であり、データのばらつきは比較的小さいが、軌道・橋梁の改造の前後や車上と地上の騒音データの比較などは同一箇所で行い、データの再現性を確保した上で次のような方法をとった。

- ① 測定はIEC規格の精密騒音計を用い、振動測定は圧電型加速度計を用いてデータレコーダに収録する。
- ② データ処理は、AD変換・FFT分析のほかは1/3OCT.フィルタを介して高速度レベルレコーダに出力することとする。この時、ペンの応動特性はFastとする。(応動特性はJIS指示騒音計に一致)
- ③ レベルレコーダ出力は、一列車通過中のデータのうち、高い方から4番目のピーク値を機械的に採用し、三列車の平均をとることを原則とする。(都営6号線においては、同一箇所において4番目ピークが上位半数平均とほとんど一致することが経験的に認められた。)

したがって、ここに示した各データは、各種の騒音規制に使用される測定値とは異ったものである。

また、主として継目衝撃音については、真の物理的音圧ともある程度の差が存在するが、この点は今後確認するつもりである。