3601 新幹線ラーメン高架橋の振動・放射音特性

正 [機] 〇上妻 雄一 (鉄道総研) 正 [機] 長倉 清 (鉄道総研) 糸永 宣昭 (JR 西日本)

An investigation on vibratory and acoustical characteristics of concrete rigid-frame bridge for Shinkansen

Yuichi KOZUMA, Railway Technical Research Institute, 2-8-38 Hikari-cho, Kokubunji-shi, Tokyo Kiyoshi NAGAKURA, Railway Technical Research Institute Nobuaki ITONAGA, West Japan Railway Co.

The railway concrete bridge noise is generated by its vibration due to the wheel-rail interaction. In the vicinity of the bridge, the bridge noise has greater contribution to the total wayside noise than other sources. Therefore, reduction of the bridge noise is important issue for the wayside noise problem. In this paper, vibratory and acoustical characteristics of concrete rigid-frame bridge for Shinkansen have been investigated by field tests and numerical analysis as a first step of promoting a better understanding of the bridge noise.

Keywords: Railway noise, Bridge noise, Concrete rigid-frame bridge, Vibratory mode, Boundary Element Method

1. はじめに

鉄道の構造物音は、レール・車輪間で生じた加振力が 軌道を介してコンクリート高架橋等の構造物に伝達され、 構造物の各部材が振動することによって発生する¹⁾.鉄 道沿線騒音に対する構造物音の寄与は、一般に他の音源 に比べるとやや小さいが、高架橋に隣接する箇所におい ては大きな影響を及ぼす場合もあり、構造物音低減が沿 線騒音問題における重要な課題の1つとなっている.

本報告では、構造物音の特性²⁾を理解する第一段階と して、衝撃加振試験や現車走行試験の結果から、新幹線 ラーメン高架橋の振動・放射音特性を明らかにし、境界 要素法を用いた放射音解析の有意性を検証した.

2. 高架橋の衝撃加振試験とその振動特性 2.1 衝撃加振試験

新幹線ラーメン高架橋(3 径間)における振動モード の同定を目的とし、インパルスハンマーを用いて図 1 に 示す黒丸部(321 点)を衝撃加振し、中間スラブ中央に 設置した振動加速度計の応答とハンマー加振力の間の伝 達関数を求めた.なお、高架橋が橋脚間の線路長手方向 とまくらぎ方向において、ほぼ対称形状であるとみなし、 加振範囲は高架橋橋脚間 1/4 の領域に限定した.



Fig.1 Diagram of impact testing

2.2 高架橋の振動特性

2.1 項により実施した衝撃加振試験で得られた中間ス ラブ中央部の上下方向の加振点応答を図2に示す.



Fig.2 Vertical driving point accelerance of the rigid-frame bridge

北川らによる,別箇所における同じ構造のラーメン高 架橋に対する測定結果では,200Hz以下の低周波数域で 周波数応答の変動が大きかった一方,200Hz以上の周波 数域で周波数応答のピークが明確ではなかった¹⁾.

本報告の中間スラブ中央部における上下方向の加振点 応答について、200Hz以下の低周波数域で文献 1)の衝撃 加振試験結果と概ね傾向は一致しているが、300Hz, 450Hzおよび 600Hz付近においてもピークが明確に発現 しており、文献 1)の傾向とは異なる.この要因について は、今後精査を要する.

衝撃加振試験で得られた中間スラブ中央の応答とハン マー加振力の間の伝達関数から振動モードの同定を行い, 得られた代表的な振動モード形状を図3に示す.以下に 代表的な振動モード形状からわかることを整理する.

[No.09-65] 日本機械学会第16回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集〔2009-12.2~4. 東京〕



図 2 における 24Hz のピークは,高架橋のスパン全体 が同位相で振動するような振動モード形状(図 3(a))に 対応する.

52Hz (図 3(b)) および 108Hz (図 3(c)) は、中間スラ ブ中央部が振動の腹部となるような振動モード形状であ り、52Hz は、張出スラブにおいて中間スラブと逆位相の 振動を伴う.

194Hz(図3(d))および229Hz(図3(e))は,高架橋中間スラブに円環状の節を含み,張出スラブも大きく変形する振動モード形状であり,229Hzは,張出スラブのレール長手方向に振動の節部が発現する.

301Hz(図 3(f)), 451Hz(図 3(g)) および 625Hz(図 3(h))は、中間スラブ内を局所的に伝搬する曲げ振動に 起因したモード形状とみられ、張出スラブや高欄の振動 は極めて小さい.

なお、本報告の振動モード同定にあたっては、中間ス ラブ中央部における周波数応答ピークを中心に進めたが、 実際は特に100Hz以上の周波数域において多数の振動モ ードが重ね合わさっていると考えられ¹⁾,全ての振動モ ードを同定しきれていない点に注意を要する.

3. 高架橋の放射音

3.1 現車走行時の放射音測定方法

ラーメン高架橋の放射音特性を求めるため、衝撃加振 試験を実施した区間を実際に車両が走行した際の騒音レ ベルを、高架橋裏面(S0H)、高架橋直下(S0)、軌道中 心から12.5m 地点(SD12.5)および高架橋を垂直面内で 放射状に取り囲む箇所など合計15点で測定した(図4).

測定対象列車は,本測定の目的が構造物音の評価であ るため,他の音源パワーレベルが小さくなる低速走行列 車(時速約 70km/h,下り線走行)とした.



Fig.4 Diagram of sound radiation measurement

3.2 現車走行時の放射音測定結果

現車走行時における, 31.5Hz バンドから 250Hz バンド までの 1/3 オクターブバンドごとの放射音分布を図 5 に 示す.





(i) 200Hz band (j) 250Hz band Fig.5 Measured bridge noise level distribution (dBA)

図5からわかることを整理する.

いずれの周波数バンドにおいても、高架橋中間スラブ の下部方向に強い指向特性を持つことが確認できる.張 出スラブや高欄からの音の放射は、中間スラブに比べる と小さく、その分布は不明瞭である.

高架橋直下の地表面付近に着目すると、50Hz バンド以下の低周波数域において騒音レベルが大きく、この要因として地面反射の影響が挙げられる.

100Hz 以上の周波数バンドでは,高架橋から離れた箇 所における騒音レベルの減衰量が低周波数域より小さい. これは高欄から回り込んだ車両下部騒音の寄与が増加し たためとみられる.

3.3 境界要素法による放射音解析方法

放射音解析は,図 6 に示す解析モデルを用いて, SYSNOISE をソルバーとして境界要素法にて行った.なお,衝撃加振試験の測定範囲を高架橋橋脚間の 1/4 の領域としたため,解析モデルも 1/4 カットモデルとし,各切断面には対称境界条件(完全反射条件)を与えた.地面については,本報告では考慮していない.



Fig.6 BEM analysis model

高架橋モデルの各要素における振動境界条件は,N次 元の振動モードの線形結合から高架橋全体の振動変位が 表現できるという考え方に基づいて設定した.これによ り,周波数の関数である高架橋各点の変位ベクトル {x(ω)}は次式のように与えられる³⁾.

$$[x(\omega)] = \sum_{r=1}^{\infty} \xi_r(\omega) \{\Phi_r\}$$
(1)

ここで、 $\xi_{r}(\omega)$ は変位ベクトル $\{x(\omega)\}$ の中に r 次の固有 モード成分がどの程度含まれているかを示すモードの刺 激係数、 $\{\Phi_{r}\}$ はモードベクトルである.

振動モード形状(モードベクトル{ ϕ_r }最大モード次数 N=57)は2.1節の衝撃加振試験で求めた.各振動モードの刺激係数 $\zeta_r(\omega)$ は,現車走行における8点(図7)の振動データ($\{x(\omega)\}$)と振動モード形状{ ϕ_r }を式(1)に代入 し,連立方程式を解くことでを求めた.連立方程式を解 く際,振動データ($\{x(\omega)\}$)数が最大モード次数(N)より少ないため,特異値分解を使用した.

以上の手順により求めた各振動モードの刺激係数 $\zeta_r(\omega)$ と振動モード形状 $\{\phi_r\}$ を,高架橋モデルの全要素に 与えることで,振動の境界条件を設定した.



Fig.7 Diagram of vibration measurement for the train pass-by

3.4 現車走行時の放射音測定結果と解析結果の比較

境界要素法を用いた解析による,31.5Hz バンドから 250Hz バンドまでの 1/3 オクターブバンドごとの放射音 分布を図 8 に示す.





Fig.8 Calculated bridge noise level distribution (dBA)

図5(測定結果)と図8(解析結果)の比較結果からわ かることを整理する.

測定結果と解析結果の騒音レベルのオーダーは、ほぼ - 致する. 解析結果においても, 測定結果と同様に, 高 架橋中間スラブの下部方向に音が強く放射されているこ とが確認できる.ただし、解析結果では張出スラブや高 欄についても160Hzバンド以下の周波数域において,強 く音が放射されている.この点については測定結果と異 なり、今後精査を要する.

また, 現車走行時の放射音および境界要素法による解 析結果について,図4の高架橋裏面(S0H),高架橋直下 (S0) および 12.5m 地点 (SD12.5) の周波数分布を図 9 に示す.



30 20 10 0 20 25 31.5 40 50 63 80 100 125 160 200 250 315 400 500 Third octave center frequency (Hz)

(b) S0 and SD12.5

(dBA) 50

. 40

Fig.9 Calculated and measured noise level of the bridge

図9からわかることを整理する.

高架橋裏面(S0H)付近では、解析結果と測定結果が 示す傾向は概ね一致する.

高架橋直下(S0)付近では、50Hzバンド以下の低周波 数域において,解析結果と測定結果の間で乖離が生ずる. この乖離は、解析において地面を考慮していないために 生じたものと考えられ、3.2節の地面反射の影響が低周 波数域で大きいことを改めて示唆している.

12.5m 地点 (SD12.5) 周辺では, ほぼ全ての周波数域 で測定結果が解析結果を上回る.これは、測定結果には 構造物音だけでなく,防音壁から回り込んだ車両下部騒 音の寄与も含まれているためと考えられる.

また,全箇所の315Hzバンド以上の周波数域において, 解析結果が測定結果を上回る. この傾向について次のよ うに考察する.

解析においては、3.3節のように解析モデルの切断面 に対称境界条件を与えており,仮想的に上下線とも同様 に振動していることになる.これは、高架橋全体が振動 するモードを含む低周波数域においては、概ね妥当な解 析条件であると考えられる.

-方, 高周波数域においては, 高架橋の各部材がそれ ぞれ局所的に振動するモードを有している可能性がある. その場合,対称境界条件を与えたカットモデルは,各部 材に対して上下線同量の振動を設定していることに相当 し、合理性に欠ける.

したがって, 高周波数域における解析精度を向上させ るためには、高架橋の部材ごとの振動特性等を考慮した 解析モデルを構築する必要があると考えられる.

4. まとめと今後の展開

新幹線ラーメン高架橋に対して衝撃加振試験を実施し, 高架橋の振動モードの同定を行った.また,衝撃加振試 験から得られた振動モード形状と現車走行時の高架橋振 動測定結果の組み合わせによる振動境界条件を境界要素 法解析モデルに与えて放射音解析を行い, 現車走行時の 放射音測定との比較,評価を行った.

その結果, 250Hz バンド以下の低周波数域で測定結果 と解析結果は概ね一致した. 振動モード形状と構造物に 対する加振力が適切に与えられれば、境界要素法を用い た放射音解析によって、250Hz バンド以下の低周波数域 では精度の高い構造物音の評価が実現できる見通しを得 た. 315Hz バンド以上の周波数域については、高架橋の 部材ごとの振動特性等を考慮した上で、解析モデルを構 築する必要があると考えられる.

今後は,本報告の手法を応用し,構造物音の現象解明 の深度化や予測手法の確立を進めていく予定である.

参考文献

- 北川敏樹,長倉清:鉄道コンクリート高架橋の振動 1) 解析,日本機械学会第19回環境工学総合シンポジウ ム 2009 講演論文集, pp.86-88, 2009.
- M.F. Harrison, D.J. Thompson, and C.J.C. Jones: The 2) calculation of noise from railway viaducts and bridges, Proc. of the IMechE, Part F, Vol. 214, pp.125-134, 2000.
- 長松昭夫: モード解析入門, コロナ社, 1993. 3)