

数値解析に基づく RC ラーメン高架橋の構造物音評価法

渡辺 勉* 宇田 東樹** 北川 敏樹**
唐津 卓哉*** 清野 多美子# 尾川 慎介#

Numerical Simulation based Evaluation Method of Structure-Borne Sound of Reinforced Concrete Viaduct

Tsutomu WATANABE Toki UDA Toshiki KITAGAWA
Takuya KARATSU Tamiko SEINO Shinsuke OGAWA

In this study, regarding to reinforced concrete viaduct, a simulation system of structure-borne noise is developed, which composes of structural vibration analysis and acoustic analysis. As results of acoustic analysis and measurement, it is found that there is a high possibility that there are frequency bands in which the structure-borne noise is the main factor of noise along the railway. Furthermore, analytical evaluation reveals that by the reinforcement of the center slab, the structure-borne noise reduction effect of 1.1 dB is obtained at the 12.5 m point and 1.8 dB at the 25 m point.

キーワード：構造物音，部材振動，高架橋，数値解析，騒音，高速化

1. はじめに

列車走行による構造物音は，列車荷重の移動や車輪及びレール表面に存在する数 μm オーダーの凹凸や線路方向の波長数 m オーダーの軌道変位等に起因して発生する変動作用力（以下，加振力）が車輪とレールを振動させ，その振動がまくらぎや軌道スラブなどの軌道構造，さらに軌道を支持する土木構造物に伝わり，各部材の振動面から音が放射されることによって発生する。コンクリート高架橋や橋梁における構造物音は，一般に数十 Hz ～ 1kHz の範囲の周波数成分で決まり，高速鉄道では，その中でも 200Hz よりも低い周波数領域が支配的になると言われている^{1) 2)}。

近年，列車速度が向上したことにより，鋼製部材で構成される鋼鉄道橋などに比べて構造物音が比較的小さいと考えられてきたコンクリート高架橋においても，部材の動的応答の増大に伴う構造物音の発生が懸念されるようになってきた。筆者らは，構造物音の予測手法を構築するにあたり，最終的なシミュレーションモデルとして，図1に示すような有限要素法による構造物の振動解析と音響解析を組み合わせた手法を用いる予定である。これまでの研究では，構造物音の原因となる鉄筋コンクリート（以下，RC）高架橋やプレストレストコンクリート（以下，PC）桁式高架橋の 200Hz 程度までの構造物振動を対象とした数値解析モデルを構築し，車両/軌道/構造物からなる全体系の各種パラメータに着目した検討を行

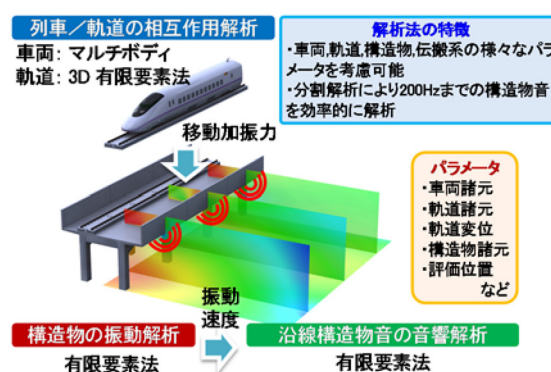


図1 シミュレーションモデルの概要

い，構造物音の発生メカニズムを明らかにした^{3) 4) 5)}。これらの検討により，RCおよびPC高架橋のすべての構造物振動が評価可能となった。本研究では，筆者らが想定している最終的なシミュレーションモデルのうち音響解析を対象として，以下の点を目標に新たに検討を行った。

- (1) 有限要素法により，新幹線標準 RC ラーメン高架橋を対象とした音響解析モデルを構築し，沿線の構造物音を解析的に求める。
- (2) 既往研究における RC ラーメン高架橋の中間スラブの補強工法⁶⁾を参考に，中間スラブの補強による構造物音低減効果を解析的に定量評価する。

2. 検討方法

2.1 対象構造物

図2に解析対象構造物を，表1に各要素の材料定数を示す。1ブロック 25m の標準3径間 RC ラーメン高架橋とそれに隣接したスパン 10m の RC 桁を対象とした。

* 鉄道力学研究部 軌道力学研究室
** 環境工学研究部 騒音解析研究室
*** 鉄道力学研究部 計算力学研究室
アドバンスソフト株式会社

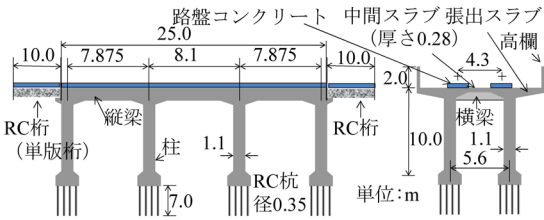


図2 解析対象構造物

表1 各要素の材料定数

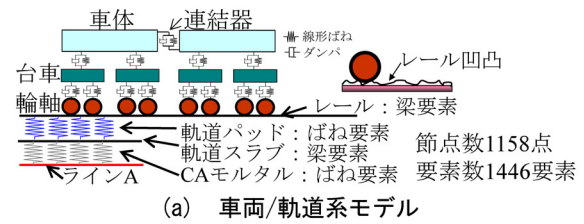
	RC ラーメン	RC 桁
レール種別	60kg レール	
軌道パッド公称ばね定数(MN/m)	60	
軌道スラブ	寸法(mm)	4930×2340×190
	ヤング係数(kN/mm ²)	31
CA モルタル	弾性係数(N/mm ²)	3500
	厚さ(mm)	25
高架橋 コンクリート	ヤング係数(kN/mm ²)	26.5
	減衰定数(%) (全てのモードで一律の値)	24.0
減衰定数(%) (全てのモードで一律の値)	2%	

RC ラーメン高架橋の柱間隔は 7.875m+8.1m+7.875m, 柱断面は 1.1m×1.1m, 柱高さは 10m, 柱中心間隔は 5.6m, 中間スラブの厚さは 0.28m, 高欄の高さは 2m, 縦梁断面は 0.85m×1.4m, 横梁断面は 0.85m×1.3m, 路盤コンクリートは 2.5m×0.25m である。基礎形式は杭形式である。軌道構造は一般的な普通スラブ軌道であり、レールは 60 kgレール, 軌道スラブは 1 枚のサイズは 4930mm×2340mm×190mm, CA モルタルの厚さは 25mm である。後述する構造物の振動解析における減衰定数は、文献 7 に基づき 2% とした。

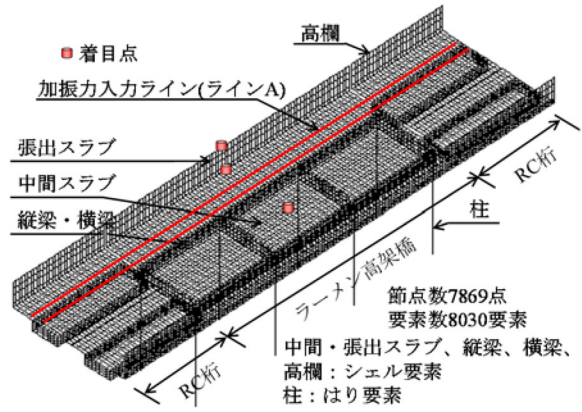
2.2 構造物の振動解析手法の概要

図 3 に構造物の振動解析における解析モデルの概要を示す。本研究では、車両、軌道、構造物からなる全体系を、車両/軌道モデルと軌道/構造物モデルに分割し弱連成問題として取り扱うことにした。これは、軌道は概ね 100Hz 以上の周波数領域で振動が卓越するが、構造物は 100Hz よりも低い周波数領域で卓越するという振動特性の違いに着目したものである。このような手法によれば、個々のモデルの解析自由度を全体系で解析する場合に比べて大幅に削減することができ、効率的に解析を行うことが可能となる。車両/軌道モデルにおける数値解析は、鉄道総研が開発した車両と鉄道構造物の動的相互作用解析プログラム DIASTARS III を、軌道/構造物モデル(図 3 参照)には線路構造物の汎用構造解析プログラム DIARIST を用いて時刻歴応答解析を実施した⁸⁾。時間刻みは 0.5msec である。

軌道および構造物の力学モデルは、有限要素法によりモデル化した。車両/軌道系モデルでは、図 3(a) に示すように、レールおよび軌道スラブをはり要素、軌道パッドおよび軌道スラブ下の CA モルタルをばね要素で



(a) 車両/軌道系モデル



(b) 軌道/構造物系モデル

図3 構造物の振動解析における解析モデルの概要

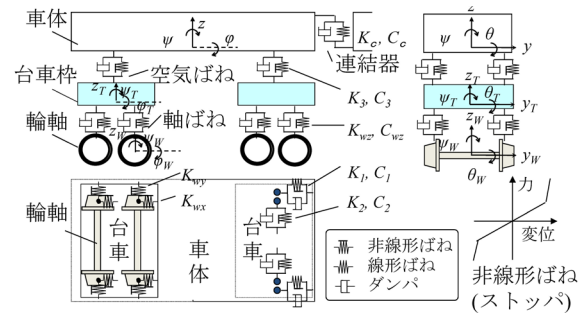


図4 車両の力学モデル

モデル化した。本モデルで CA モルタル相当のばね要素のばね反力を求め、これを加振力として軌道/構造物系モデルのレール位置と路盤コンクリートなどによる荷重分散を考慮した加振力入力ラインに入力する。列車走行に伴う加振力を精緻に再現することが重要であるため、レールを模擬したはり要素には、実際の高架橋上で長さ 1m の測定機(原田製作所製)を用いて測定したレール凹凸と 10m 分の軌道変位を与えた³⁾。軌道/構造物系モデルでは、図 3(b) に示すように、高欄、張出スラブ、中間スラブ、縦梁および横梁はシェル要素、柱ははり要素でモデル化した。軌道部材については、重量のみを考慮し、スラブに付加した。地中梁や地盤については、構造物音に寄与する周波数帯(概ね 20Hz 以上)における各部材の応答に与える影響が小さいことを確認したうえで、モデル化を省略することとし、柱下端を固定とした。両者のモデルともに、メッシュ刻みはレール締結間隔(0.625m)の 1/4 間隔に相当する 0.15625m を基本とした。車両/軌道系モデルでは総節点数 1158 点、総要素数 1446 要素、軌道/構造物系モデルでは総節点数 7869

点、総要素数は 8030 要素である。

車両の力学モデルは、図 4 に示すように、車体、台車及び輪軸を剛体と仮定し、それらをばねとダンパで結合した三次元モデルで、1 車両あたり 31 自由度である。列車は、車両の端部に設けたばねとダンパで連結して構成する。本研究では、車両長 25m、輪重 60kN 程度の一般的な新幹線車両 6 両とした。車両とレール間の動的相互作用力については鉛直方向の接触力を Hertz の接触ばねで表現した。

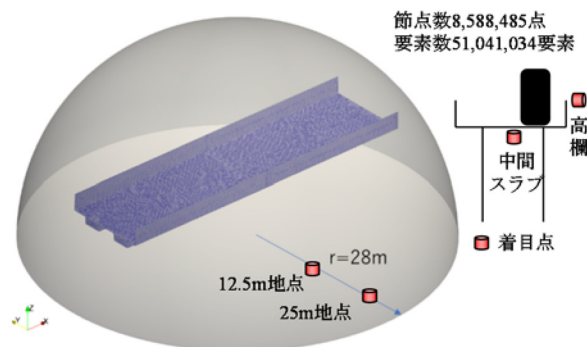


図 5 沿線構造物音の音響解析における解析モデルの概要

2.3 沿線構造物音の音響解析手法の概要

図 5 に沿線構造物音の音響解析における解析モデルの概要を、表 2 に音響解析における解析定数と境界条件をそれぞれ示す。音響解析には有限要素法の解析コード Advance/FrontNoise^{9) 10)} の周波数領域音響ソルバーを用いた。本ソルバーは有限要素法を用いており、境界要素法に比べ大規模問題に対して高速な処理が可能であるという利点がある。また、無限要素を利用することで、解析領域を最小現にとどめ、解析コストを削減することにより外部問題も高速に解くことが可能である。基礎方程式は、音響ポテンシャル $\phi_v(x)$ 、角振動数 ω 、音速 c において、速度場の影響はないものとして式 (1) の Helmholtz 方程式として表される。

$$\nabla^2 \phi_v(x) + k^2 \phi_v(x) = 0, \quad k = \frac{\omega}{c} \quad (1)$$

境界条件は音響速度ポテンシャルの各周波数成分 $\phi(x)$ に対して混合境界条件として課し、加振点の速度 $v(x)$ は式 (2) の Neumann 型の境界条件として与える。

$$\frac{\partial \phi(x)}{\partial n} = v(x) \quad (2)$$

無限遠点の境界条件は放射源から十分に離れた場所 $r = R$ において式 (3) として取り扱う。

$$\frac{\partial \phi(r)}{\partial n} = -ik\phi(r) \quad \text{at} \quad r = R \rightarrow \infty \quad (3)$$

音響解析の領域は、1 ブロック 25m の標準 3 径間 RC ラーメン高架橋とそれに隣接したスパン 10m の RC 桁を包含できる領域として、地表面から半径 28m の半球ドーム型の領域に 8,588,485 節点、51,041,034 要素の四面体メッシュ (1 メッシュサイズ 0.2m) を作成し、構造物を内部境界面とした。音源は、振動解析により得られた構造物の加速度時刻歴をフーリエ変換により最大 200Hz までの周波数領域に変換し、内部境界面へマッピングして適用した。また、地面は完全反射境界、半球面は無限境界と定義した。基礎方程式および境界条件を有限要素法で離散化して、解析領域内の音響速度ポテンシャルや音圧レベルを算出する。行列解法には GMRES 系の反復解法を使用した。

表 2 音響解析における解析定数と境界条件

	定数		境界条件
音速(m/s)	340	ドーム部	無限境界
空気密度(kg/m ³)	1.225	地面	完全反射境界
解析周波数(Hz)	200 ($\Delta f = 0.49$)	高架橋	面音源

表 3 解析ケース

解析ケース	中間スラブ	列車速度
1	無補強	270km/h
2	補強 ⁶⁾	270km/h

2.4 解析ケース

表 3 に解析ケースを示す。解析ケースは RC ラーメン高架橋の中間スラブを補強した場合と無補強の場合の 2 ケースである。列車速度は 270km/h とした。具体的な補強工法は文献 6 に示すとおりであり、既設ラーメン高架橋の中間スラブ下面に、高強度繊維補強コンクリートで製作されたパネルを敷き詰めて補強する工法で、スラブの曲げ剛性は無補強の場合に比べて 5 倍程度増加することが確認されている。

2.5 解析結果の評価手法

構造物の振動解析においては、高架橋の振動加速度を振動加速度レベルで評価することとした。評価部材は中間スラブと張出スラブの先端の上下振動、高欄先端の線路直角方向の水平振動とし、圧電型加速度計 (リオン PV-85) により測定した実測値との比較を実施した。

音響解析においては、高架橋の中間スラブ中央近傍点、列車載荷側の高欄先端の近傍点、軌道中心から 12.5m 地点および 25m 地点 (高さ 1.2m) における音圧レベルで評価することとし、評価位置を含む半径 400mm の球形の領域内に含まれる節点の音圧レベルを取得し、その平均値を評価値とした。フーリエ変換に使用した時刻は列車通過中の 2.048sec である。なお、沿線騒音の実測値は超低周波音圧レベル計 (リオン XN-1J) により測定した。この実測値には、当然のことながら構造物音以外の音も含まれるものである。

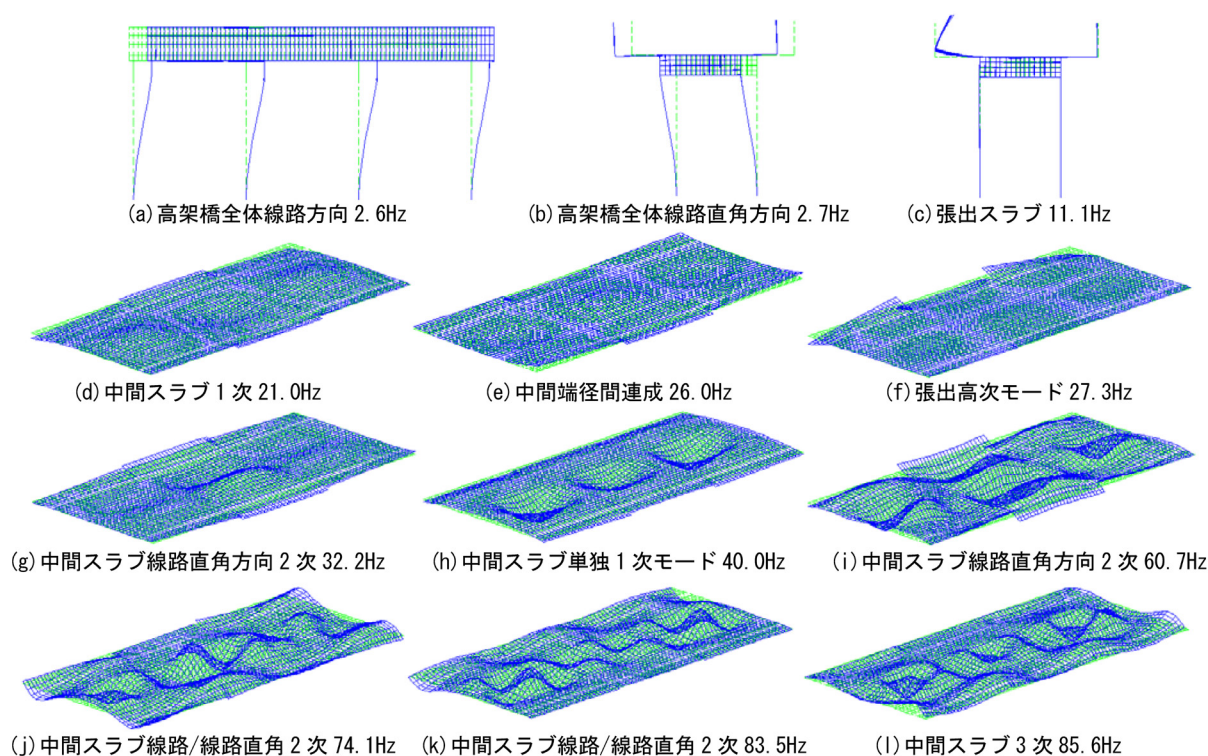


図6 振動モード形の例（解析結果）

3. 検討結果

3.1 構造物の振動解析

3.1.1 構造物の部材振動モード形

図6にRC ラーメン高架橋の主要な部材振動モード形の例を示す。後述する音響解析で音圧レベルが大きい部材である中間スラブを中心に示した。これらの実測との整合性については文献11を参考にされたい。当然のことながらここに示す以外にも多様な振動モードが存在する。図6を見ると、高架橋全体の線路方向及び線路直角方向の固有振動モード形は2.6Hz及び2.7Hzにおいて現れる。ただし、本モデルでは柱下端を固定しており、地盤、地中梁及び基礎構造を適切にモデル化すると全体振動モード形の固有振動数は変化すると考えられる。張出スラブの振動モード形は11.1Hzで現れる。張出スラブは中間スラブや高欄と連成した振動モード形も数多く存在する。中間スラブの振動モード形は、1次モードが21.0Hzで現れ、モード次数が増えるほど振動モード形の腹と節の数が増えていく。60~85Hzまでの周波数帯は、特に部材同士が連成した複雑な振動モード形が多数現れる結果となった。

3.1.2 振動加速度レベル

図7にRC ラーメン高架橋の振動加速度レベルの実測と解析の比較を示す。実測は10試番程度の結果の最大値から最小値までを赤帯で表示した。図7より、中間スラブ、張出スラブおよび高欄ともに3.15Hzの帯域にピークがみられるが、これは列車速度270km/hで車両

長25mの列車が走行する時の加振周波数3.0Hzの影響である。中間スラブについては、3.15Hz、8Hz、20Hz、31.5Hzなどの主要な応答ピークを概ね再現できていることが分かる。張出スラブについては、8~12.5Hz、20Hz、31.5Hzの主要な応答ピークを概ね再現できていることが分かる。高欄については、3.15Hz、20Hz、31.5Hzの主要な応答ピークは再現できているが、8Hzや16Hz付近の応答に乖離が見られる。これは、実際の施工目地にはある剛性を持った弾性体が埋め込まれているのに対して、本解析モデルでは高欄の施工目地を境に要素を完全に分離してモデル化しており、高欄を模擬したシェル要素の境界条件が実際とは異なることが原因の1つと考えている。

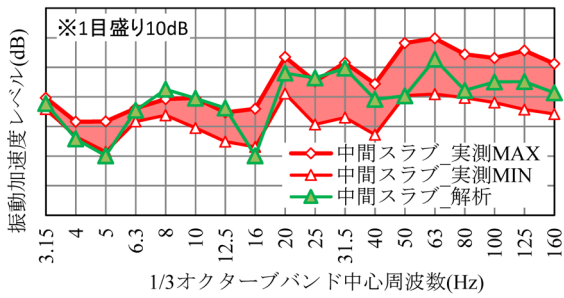
以上のように、一部の周波数帯において解析結果と実測に乖離があるが、本手法によりRC ラーメン高架橋の振動をある程度再現可能であること実証された。

さらに、図7において振動加速度レベルの部材ごとの解析結果を比較すると、張出スラブ先端に比べて、中間スラブ中央や高欄先端の振動加速度レベルが全周波数帯にわたって大きいことが分かる。これは、中間スラブ中央が面部材の中央、また、高欄先端が片持ち梁の先端であり、振動しやすい位置にあるためである。

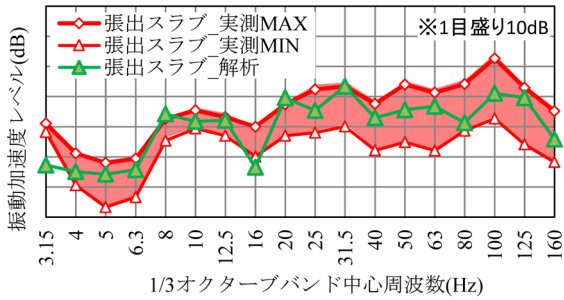
3.2 沿線構造物音の音響解析

3.2.1 音圧レベル

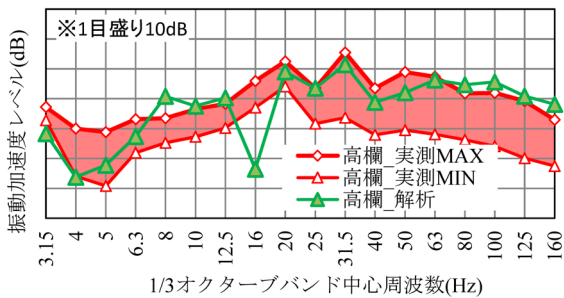
図8にRC ラーメン高架橋の沿線構造物音の音響解析結果を示す。面部材である中間スラブ中央の近傍が



(a) 中間スラブ中央



(b) 張出スラブ先端



(c) 高欄先端

図7 振動加速度レベルの実測と解析の比較

最も音圧レベルが大きいことが分かる。12.5m 地点と 25m 地点をみると、概ね高架橋から離れるにしたがって音圧レベルが小さくなるが、31.5Hz や 100Hz のように逆転している周波数帯も見られる。また、6.3Hz、16~20Hz、80Hz では、高欄先端の近傍よりも 12.5m 地点の音圧レベルの方が大きいことが分かる。

3.2.2 音圧分布の可視化

図9にRC ラーメン高架橋の振動モード形と音圧分布の例を示す。ここでは、21.0Hz、60.7Hz、83.5Hz を取り上げた。これらの周波数は、図8に示す 12.5m 地点における音響解析の結果において、他の周波数に比べて音圧レベルが大きい周波数である。解析領域内において音圧の大小が変動しており、高い周波数ほど音圧分布の縞模様の間隔が狭くなっていることがわかる。

3.2.3 構造物音以外の音も含む沿線騒音の実測値と解析結果の比較

図10にRC ラーメン高架橋における音響解析の結果と実測との比較を示す。比較した点は、軌道中心から 12.5m の地点であり、列車速度は 270km/h である。解析で得られた音圧レベルは、構造物から発生した音のみ

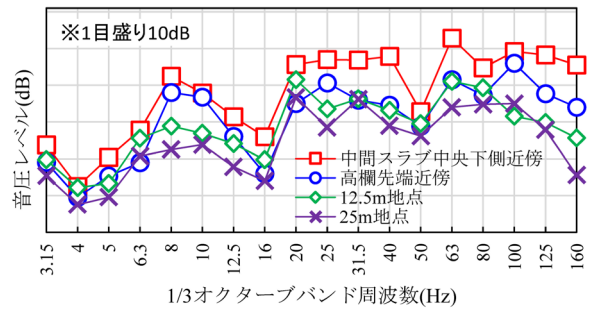


図8 沿線構造物音の音響解析結果

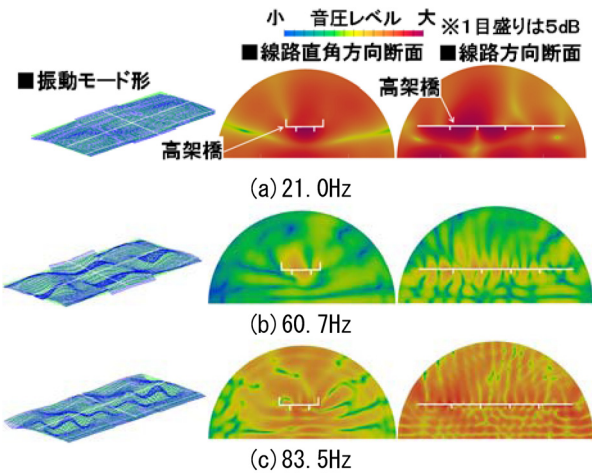


図9 振動モード形と音圧分布の例

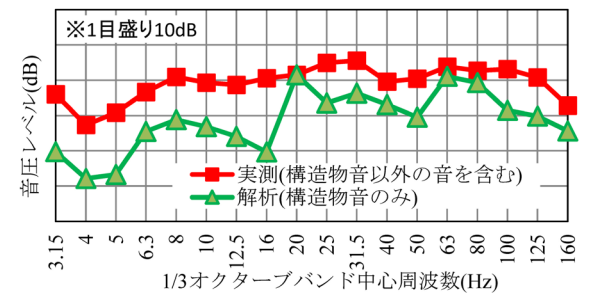


図10 音響解析結果と実測との比較 (12.5m 地点)

で構成されるものであるのに対し、実測した音圧レベルは、12.5m 地点で実測した騒音で、構造物以外の音源から発生した音 (特に空力音) も含まれているため、解析結果は実測とは一致しない。解析結果と実測を比較すると、前述の通り、構造物音以外の音も含まれるため、ほぼすべての周波数帯で実測が解析結果よりも大きいことがわかる。しかしながら、20Hz、63Hz、80Hz ではその差が他の周波数帯に比べて小さくなっていることがわかる。これらの周波数帯は、図9で示した通り、中間スラブや張出スラブの固有振動モードが卓越する周波数帯であるため、他の周波数帯に比べて音圧レベルが大きくなったためと考えられる。沿線騒音は様々な音源から発生した音が合成されたものであり一概には言えないが今回の解析条件においては、構造物の固有振動モードが卓越する周波数帯において、構造物音が空力音等の成分と同程度以上の寄与を持つ可能性があることがわかった。

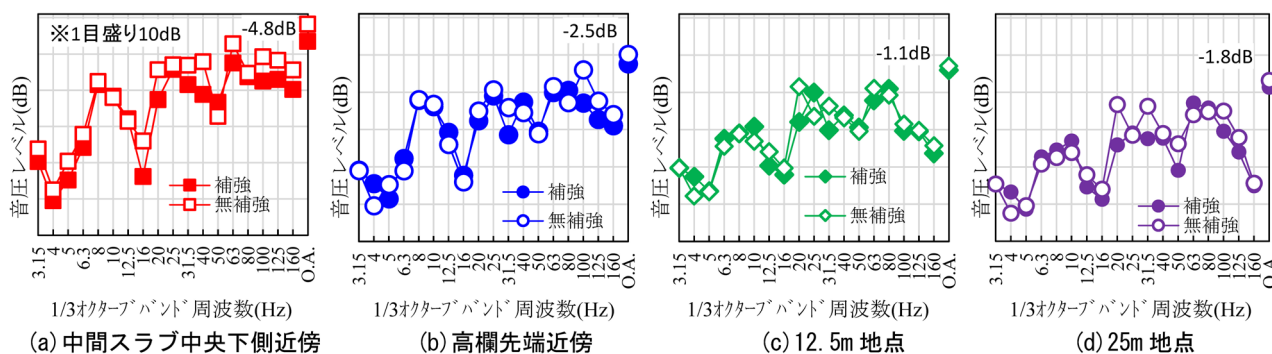


図 11 中間スラブを補強したことによる構造物音への影響（解析結果）

なお、文献 12 のように構造物音が卓越することが実証された例もある。

3.3 中間スラブ補強による構造物音低減効果

図 11 に中間スラブを補強したことによる構造物音への影響に関する解析結果を示す。同図には 3.15 ～ 160Hz 帯のオーバーオール値 (O.A.) を併せて示した。中間スラブを補強することにより構造物音低減効果が得られた。O.A. による評価では、中間スラブ中央の下側近傍では 4.8dB、高欄先端近傍では 2.5dB、12.5m 地点では 1.1dB、25m 地点では 1.8dB の構造物音低減効果が得られた。図 6 で中間スラブの振動モード形を示したが、21.0Hz ではすべての着目点で低減効果が得られた。これは補強により固有振動数が高周波数側にシフトしたためであると考えられる。一方で、振動モード形が複雑に多数存在する 60 ～ 85Hz までの周波数帯では、12.5m 地点では 63Hz で低減効果が得られたが 80Hz では逆効果となり、25m 地点では低減効果がその逆となるなど、評価箇所や周波数帯によって中間スラブの補強が音圧レベルに及ぼす影響が異なる結果となった。

4. まとめ

本研究では、新幹線標準 RC ラーメン高架橋を対象に、沿線構造物音を解析的に評価可能な解析手法を新たに構築した。それにより得られた知見は以下の通りとなる。

- (1) 軌道中心から 12.5m 地点の音圧レベルについて、構造物音のみを含む解析結果と構造物音以外の音も含まれる実測とを比較した結果、構造物の固有振動モードが卓越する周波数帯では解析結果と実測結果の差が小さくなった。このことから、構造物の固有振動モードが卓越する周波数帯において、構造物音が空力音等の成分と同程度以上の寄与を持つ可能性を示した。
- (2) RC ラーメン高架橋の中間スラブの補強工法⁶⁾を参考に、補強による構造物音低減効果を解析的に評価した結果、例えば 12.5m 地点では 1.1dB、25m 地点では 1.8dB の低減効果が得られる可能性を示した。

文 献

- 1) 長倉 清：構造物音の特性と低減対策, JREA, Vol.50, No.12, pp.51-53, 2007
- 2) 北川敏樹：鉄道騒音の特性と防止策, 日本音響学会誌, Vol.64, No.10, pp.629-634, 2008
- 3) 渡辺勉, 曾我部正道, 徳永宗正：車両 / 軌道 / 構造物の各種パラメータが鉄道 RC ラーメン高架橋の部材振動特性に及ぼす影響に関する数値解析的検討, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.69, No.2, pp.I_821-I_832, 2013
- 4) 渡辺勉, 曾我部正道, 徳永宗正, 松岡弘大：軌道状態に着目した鉄道 RC 桁式高架橋の部材振動低減対策, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.775-780, 2014
- 5) 渡辺勉, 宇田東樹, 北川敏樹, 唐津卓哉, 清野多美子, 尾川慎介：数値解析に基づく RC 高架橋の構造物音評価法, 第 26 回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2019), S2-2-6, pp.31-34, 2019
- 6) 白井貴之, 笠倉亮太, 渡辺勉, 仁平達也：超高強度繊維補強コンクリートによる RC スラブの補強工法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.1243-1248, 2014
- 7) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 (コンクリート構造物), 丸善, 付属資料 4, 2004
- 8) 曾我部正道, 松本信之, 藤野陽三, 涌井一, 金森真, 宮本雅章：共振領域におけるコンクリート鉄道橋の動的設計法に関する研究, 土木学会論文集, No.724/I-62, pp.83-102, 2003
- 9) 松原聖, 大家史, 尾川慎介：音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise, アドバンスシミュレーション, Vol.20, pp.65-74, 2014
- 10) 松原聖, 尾川慎介：音響解析ソフトウェア Advance/FrontNoise への無限要素導入, アドバンスシミュレーション, Vol.23, pp.55-87, 2016
- 11) 松岡 弘大, 貝戸 清之, 渡辺 勉, 曾我部 正道：走行列車荷重を利用した RC 鉄道高架橋の部材振動の同定と動的挙動の把握, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.67, No.3, pp. 545-564, 2011
- 12) 阿久津真理子, 宇田東樹, 北川敏樹, 若林雄介：高架橋区間における新幹線走行時の明かり区間圧力変動, 日本騒音制御工学会秋季研究発表会講演論文集, pp.97-100, 2019