

論文 雑音を含む打撃音に基づく RC 部材の固有振動数推定に関する研究

大島 義信^{*1}・杉浦 邦征^{*2}・服部 篤史^{*3}・河野 広隆^{*4}

要旨: 本稿では、測定対象となる RC 部材をハンマーで打撃した際に発生する打撃音に基づき、その部材の固有振動数を推定する技術について検討した結果を示す。特に、走行車両から RC 床版を打撃することを想定し、雑音が混入した観測音から打撃音を識別し固有振動数を推定する手法について、梁供試体を用いた実験により検討を行った。雑音の除去に関しては、時間周波数分析を用いた独立成分分析による手法を適用し、その効果を検証した。その結果、実験の実施範囲内では、雑音環境下でも打撃音から RC 梁部材の固有振動数を効果的に推定できることや、適用には限界があることなどが明らかとなった。

キーワード: 雑音除去, 独立成分分析, 固有振動数

1. はじめに

日本国内には、鋼橋、コンクリート橋を問わず、RC 床版を有する道路橋が多く存在している。RC 床版は、車両などの荷重を直接支持するため、劣化損傷が発生しやすい部材の一つである。現在、RC 床版の健全性評価は、床版裏面からの目視点検が基本となっているが、より合理的かつ簡易な維持管理法が求められている。

RC 床版の主な劣化は、輪荷重の繰り返し载荷による疲労ひび割れの進展である¹⁾。そのため目視点検においてひび割れ性状を把握することで、劣化過程を判断している²⁾。また RC 床版は、RC 梁などに比べ断面高さが小さいため、ひび割れなどにより断面欠損をした場合、剛性が比較的大きく変化する。そのため、たわみ量と劣化状態を関連付けることで健全性を評価する試みがある³⁾。しかし床版のたわみ量は微小であり、実測することが困難であるため、定量的かつ実用的な指標としては適用しにくい。

一方で、ひび割れの進展過程と固有振動数を関連付ける研究が行われており、特に二次固有振動数と損傷状態には明確な相関があることが明らかとなっている⁴⁾⁵⁾。そのため固有振動数は、床版の健全性を示す定量的な指標になりうると考えられる。

通常、構造物の固有振動数を推定する場合、構造物に加速度計などのセンサを設置し測定を行う。RC 床版の固有振動数を推定する場合でも、床版上もしくは下面にセンサを設置し、加速度を測定する。しかし、供用下で RC 床版にこのようなセンサを設置するには、足場など大掛かりな作業が必要となり、実用的でないなどの問題点があった。

そこで著者らは、**図-1** に示す検査車両を想定し、車

両上から床版を打撃しながら走行し、その打撃音から床版の固有振動数を推定する技術を提案する。最終的には、推定した固有振動数の変化から、床版の大まかな健全性を評価し、詳細調査へと繋げる一次スクリーニングとして利用したいと考えている。このような検査車両を実現するには、風切り音など雑音下で観測された打撃音から、床版の衝撃音を抽出する技術が必要である。よって本研究では、検査車両の技術を確立するための基礎実験として、雑音下において RC 梁の固有振動数を推定する実験を実施した。ただし、従来のスペクトルフィルタを用いた雑音除去法では、打撃音成分の卓越周波数に近い雑音を除去することができない。そのため本研究では、独立成分分析の手法を応用し、スペクトルによらない時間周波数領域での雑音分離を試みた。この手法により、雑音と打撃音のスペクトル特性が近い場合でも、雑音を除去できる可能性がある。本稿では、雑音除去に特化した基礎実験で得られた検討結果と知見を示す。

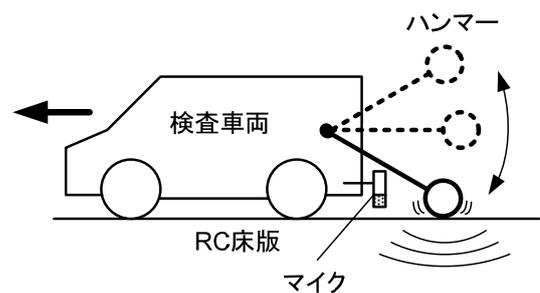


図-1 移動検査車両のイメージ

2. 梁供試体における雑音除去実験

2.1 実験の概要

梁供試体を用いた実験では、人工的な雑音を発生させ

*1 京都大学 工学研究科准教授 博(工) (正会員)

*2 京都大学 工学研究科教授 Ph.D. (正会員)

*3 京都大学 工学研究科准教授 博(工) (正会員)

*4 京都大学 経営管理大学院 博(工) (正会員)

た環境下で、梁供試体に対しハンマーによる打撃を行い、観測した打撃音から梁の固有振動数の推定を行う。本研究では、雑音の除去法として、独立成分分析の手法を応用し、独立成分とみなした雑音を打撃音信号から分離することを試みる。またアスファルト舗装を想定し、剛性が異なるハンマーヘッドの影響についても検討を行う。

図-2 に示す通り、実験に用いた供試体は 2200×200×300mm の RC 梁供試体であり、実験時の弾性係数および圧縮強度は 3000N/mm² および 45MPa であった。図-3 に示す通り、ハンマーの打撃位置は支間中央とし、合計 4 つの加速度計を上面および下面に設置した。加速度計は圧電素子型の加速度計（小野測器 NP-2120）を用いている。また打撃音観測用のマイクは、地表面から 840mm、供試体から 400mm 離れた位置で、中央と左右それぞれ 700mm ずつ離して設置した。人工的な雑音は、図-4 に示す鋼板をバイブレータで振動させて発生させた。雑音発生源は、地表面の梁供試体中央から 500mm 離れた位置に設定した。雑音源とマイクの位置を図-5 に示す。また実験状況を図-6 に示す。梁供試体は、打撃による跳ね返りを防止するため、上下から鋼製支点により拘束している。

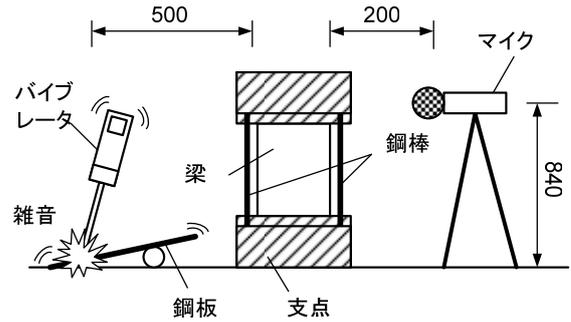


図-5 雑音源とマイク位置

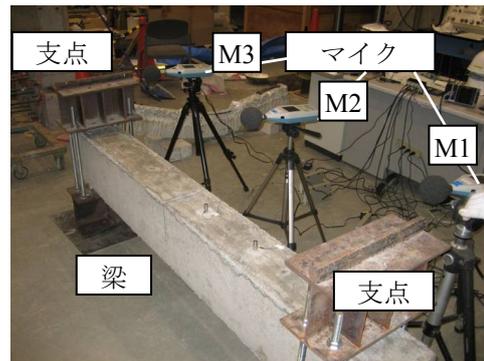


図-6 実験概要

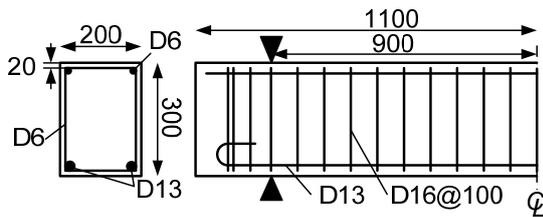


図-2 梁供試体寸法（単位 mm）

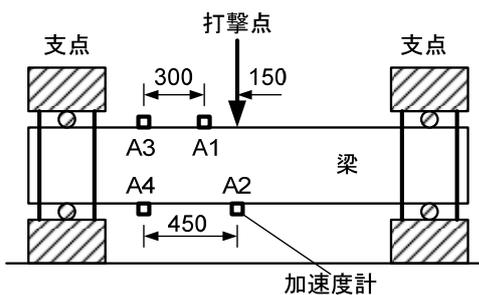


図-3 打撃位置と加速度計位置（単位 mm）



図-4 鋼板とバイブレータ

また実験では、剛性の異なる二種類のハンマーヘッドを用いた。剛性の高いハードヘッドの特性値に関しては、入力波形の伝達帯域として 600Hz まで発生させることができる。また剛性の低いソフトヘッドでは、300Hz までの伝達帯域を有している。

2.2 独立成分分析

本研究では、効果的な雑音除去法として独立成分分析 (ICA: Independent Component Analysis) に基づく方法を用いる。ICA とは、複数の音源からの原信号が混合した観測信号に対し、各原信号の独立性を仮定することで、観測信号のみから原信号を推定する手法である⁹⁾。ICA は、音声分離やパターン認識などの分野でも応用されるなど、信号分離法として有力なツールである。一般に、ICA は式(2)で示される瞬間混合による合成信号を対象としている。

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A} \mathbf{s}(t) \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{x}(t)$ は観測信号、 \mathbf{A} は混合行列、 $\mathbf{s}(t)$ は原信号である。ICA では、観測信号のみから、混合行列 \mathbf{A} の一般化逆行列である復元行列 \mathbf{W} および原信号を推定する。復元行列が得られれば、以下のように独立成分の推定値を得る。

$$\hat{\mathbf{s}}(t) = \mathbf{W} \mathbf{x}(t) \quad (3)$$

しかし、一般的に音声などの伝播は瞬間混合ではなく、

以下のような一種の畳み込み積分として表現される。

$$\mathbf{x}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} A(t-\tau)\mathbf{s}(\tau)d\tau = A*\mathbf{s}(t) \quad (4)$$

すなわち、時刻 t の観測信号 $\mathbf{x}(t)$ には、その瞬間 t の原信号のみならず、遅延して入力される原信号が含まれることになる。そのため瞬間混合を仮定している通常の ICA を、このような現象に直接適用することができない。

そこで本研究では、短時間フーリエ変換により信号を時間周波数空間へと変換し、式(4)を次のような瞬間混合の式へと変換する⁷⁾。

$$\mathbf{X}(t_s, f) = \tilde{A}(f)\mathbf{S}(t_s, f) \quad (5)$$

ここで、 t_s は短時間フーリエ変換の時間ステップ、 f は振動数である。また \mathbf{X} および \mathbf{S} は、観測信号および原信号のフーリエ振幅である。短時間フーリエ変換を実施することにより、時間領域における畳み込み積分が、周波数領域においてフーリエ振幅の積に変形されている。これにより、畳み込み積分が近似的に時間ステップの瞬間混合となり、通常の ICA アルゴリズムを適用できる。ただし、短時間フーリエ変換によるウィンドウの幅 t_w は、総時間ステップ数を小さくしすぎない程度に大きく取る必要がある。

一方本研究では、瞬間混合の ICA のアルゴリズムとして、不動点法 (Fast-ICA) の適用を試みる⁸⁾。この方法は、統計的に独立な確率変数の和はガウス分布に近づくことを利用し、観測信号の 4 次キムラントが最小となるよう復元行列を決定するものである。いま復元行列 \mathbf{W} を構成する一つの縦ベクトルを \mathbf{w} とすれば、

$$\mathbf{w} \leftarrow E\left[\left(\mathbf{w}^T \mathbf{x}\right)^3 \mathbf{x}\right] - 3\mathbf{w} \quad (6)$$

$$\|\mathbf{w}\| = 1 \quad (7)$$

により更新則が与えられる。ただし、 $E[\cdot]$ は確率の期待値を表し、標本値の平均で代用する。一つの縦ベクトルが決定されれば、そのベクトルに直交するよう次のベクトルを決定していく (Gram-Schmidt の直交化法)。最終的に、

$$\mathbf{W} = (\mathbf{w}_1 \quad \mathbf{w}_1 \quad \cdots \quad \mathbf{w}_n) \quad (8)$$

のように、独立成分の数に応じて復元行列が求まる。ただし、時間周波数解析により変形された波形 $\mathbf{S}(t_s, f)$ は複素数であるため、不動点法の ICA アルゴリズムを複素数へ拡張する必要がある。複素信号に ICA を適用する場合、それぞれの信号の独立性のほか、一つの成分中の虚部と実部の独立性も仮定することになる⁹⁾。複素変数の分布が球対称である場合、複素数の絶対値に基づく非ガウ

ス性の尺度を用いることになる。この場合の更新則は、

$$\begin{aligned} \mathbf{w} \leftarrow E\left[\mathbf{x}(\mathbf{w}^H \mathbf{x})^* g\left(|\mathbf{w}^H \mathbf{x}|^2\right)\right] \\ - E\left[g\left(|\mathbf{w}^H \mathbf{x}|^2\right) + |\mathbf{w}^H \mathbf{x}|^2 g'\left(|\mathbf{w}^H \mathbf{x}|^2\right)\right] \mathbf{w} \end{aligned} \quad (9)$$

で与えられる。ここで、関数 g は適当な増加関数、 g' はその導関数であり、本研究では、より頑健な結果が得られる

$$g(y) = \frac{1}{0.1 + y} \quad (10)$$

を用いた。また「*」は共役複素数を表す。

以上より、各周波数における複素信号が得られる。しかし、周波数ごとに得られた推定信号は、周波数によってその順序と振幅が異なるため、このままでは全周波数で同一の信号を組み合わせることができない。この問題を解決するため、猿渡¹⁰⁾らの考え方にに基づき、アレイ信号の指向特性に着目して順序と振幅を決定する。式(5)から、 I 番目の原信号 S_I は、復元行列 \mathbf{W} の (I, j) 成分 W_{Ij} を重みとする、アレイ信号 X_j の和で表されている。いま、マイクの位置 d_k 、および各音源からの音波の入射方向 θ_m を図-7 に示すよう仮定する。このとき、推定信号 I の指向特性は、

$$F_I(f, \theta) = \sum_{k=1}^n W_{Ik}(f) \exp(i2\pi f d_k \sin \theta / c) \quad (10)$$

のように表される。ただし、 i は虚数、 c は音速(=340m/s)である。この特性値は、空間に対してアレイマイクが形成する利得の分布を表すもので、この特性値が最も小さくなる方向 θ_m が音源の方向となる。すなわち、音源の位置が異なれば、実際の位置関係である $\theta_{m,I} > \theta_{m,J} > \theta_{m,K}$ の関係から、推定信号の並び替えを行うことができる。また、音源 I の方向性 $\hat{\theta}_I$ は、以下に示す全ての周波数を通じた平均値を推定値とする。

$$\hat{\theta}_I = \frac{2}{N} \sum_{m=1}^{N/2} \theta_I(f_m) \quad (11)$$

また平均値として定義された方向 $\hat{\theta}_I$ における特性値 $F_I(f, \hat{\theta}_I)$ は、一種のゲインを表す。よって本研究では、その特性値を用いて振幅を正規化する。

以上より、ある周波数 f における復元行列は、振幅の補正と順列を考慮して、以下のように表現される。

$$\hat{W} = P\mathbf{W} \quad (12)$$

ここで P は、序列と振幅を補正する行列であり、 I 番目

の推定信号が i 番目の原信号である場合、 P の i 行目の成分は、 I 列目のみ成分を有するベクトル \mathbf{p}

$$\mathbf{p} = (0 \quad \cdots \quad 1/F_I(\theta_i, f) \quad \cdots \quad 0) \quad (13)$$

で表される。最終的に、この補正された復元行列を用いて原信号を復元し、短時間逆フーリエ変換を施すことで時間領域での波形を得る。ただし、復元された信号の正負と、絶対値に関しては不定のままである。また本研究では、短時間フーリエ変換においてハミングのウィンドウを用い、その逆変換では得られた信号にウィンドウ係数の逆数を乗じている。またウィンドウ幅は 501/20000 秒とした。

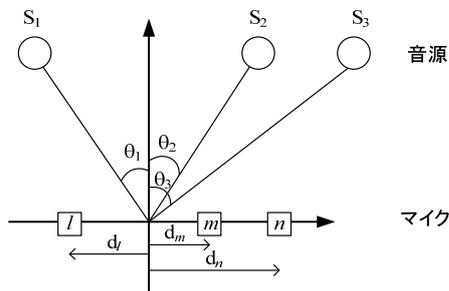


図-7 アレイの位置関係

2.3 加速度センサによる卓越振動数

図-8 に、加速度計により得られたパワースペクトルを示す。ただし、ここではハードヘッドによる打撃を行い、サンプリングレート 20kHz、データ数 10000 のデータに基づいている。またパワースペクトルは Burg 法¹¹⁾に基づき算定を行っている。Burg 法の次数はデータ数の平方根の 3 倍として 300 とした。図より、51Hz, 186Hz, 220Hz などピークを確認できる。ただし、下記式(14)の簡易式から算定される低次の固有振動数は、84Hz および 336Hz であり、これらの数字とは異なっている。

$$f = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{EI}{A\rho}} \quad (14)$$

ここで、 L = 支間長、 EI = 剛性 (弾性係数×断面二次モーメント)、 A = 換算断面積、 ρ = 平均密度である。この不一致は支点の跳ね返りによるものと考えられるため、支点をバネで表現した二次元の FEM モデルを構築し、解析を行った。バネの表現として回転バネおよび鉛直方向バネが考えられるが、ここでは鉛直バネを想定した。また算定値と実測値が近づくようバネ定数を調整し、最終的にバネ定数を 15000N/mm と設定した。以上の計算で想定した諸定数を表-1 に示す。また FEM 解析による結果と実験で得られた推定値を表-2 に示す。表より、両者はほぼ一致することができたが、186Hz に関してはねじ

りモードと考えられ、二次元のモデルでは算定できなかった。

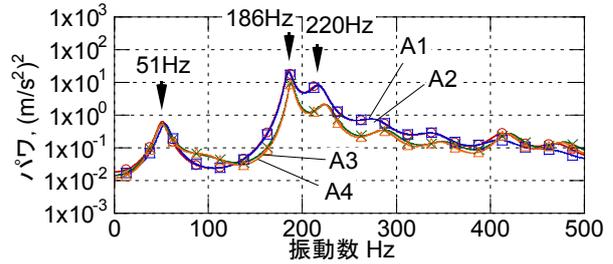


図-8 加速度計によるパワースペクトル

表-1 想定した緒定数

ρ	2.41×10^{-9}	A (mm ²)	6.47×10^4
E (N/mm ²)	2.5×10^4	I (mm ⁴)	1.89×10^8
L (mm)	1800		

表-2 FEM モデルによる算定結果

測定値 Hz	51	186	220	540	990
計算値 Hz	50	—	224	534	928

2.4 独立成分分析による雑音除去

図-9 に、人工雑音が混入した場合の観測信号と、無い場合の信号を示す。ただし、観測信号は中央のマイクによる。これより、人工雑音の振幅は比較的大きく、ハンマーの衝撃音が雑音に埋もれていることがわかる。このとき、両者のパワースペクトルは図-10 および図-11 で表される。図中 M1~M3 はマイクの位置を表し、梁供試体に向かって左から 1, 2, 3 としている。これらの図より、雑音環境下でも 60Hz のピークが確認できることがわかる。しかし、200Hz 付近のピークは雑音に埋もれて完全に消失している。そのため、単純にバンドパスフィルタを用いた場合、雑音とともに有用な信号データも消去されることになる。

一方、ICA により得られた打撃音の推定信号を図-12 に、雑音の推定信号を図-13 に示す。ただし、波形方向が 0 度 (中央から直進) となっているものを打撃音とみなした。これより、明確な衝撃波形を有する成分と、雑音が混合された成分に分離できていることがわかる。これは、高周波などを含む雑音成分と打撃成分とが独立であると判断されたためである。ただし、衝撃の最も大きい 0.1 秒付近では、雑音成分にも衝撃の影響が現れている。雑音と打撃音を完全に分離できなかった理由として、短時間フーリエ変換におけるステップ数やウィンドウ幅の影響や、雑音のガウス性などの影響が考えられる。すなわち、ウィンドウ幅によって抽出できる振動数に制約が発生するため、逆変換などのプロセスで情報が失わ

れる可能性がある。また本研究では雑音源を一つの独立成分として扱っているが、雑音の発生過程が強いガウス性を有する場合、独立成分分析の精度が低下する。また打撃音と雑音の音源が近く、アレイの方向性によって信号を区別できなかった可能性もある。これらの問題は、アレイ配置の最適化などにより改善できる可能性があるため、今後も検討を行っていきたい。

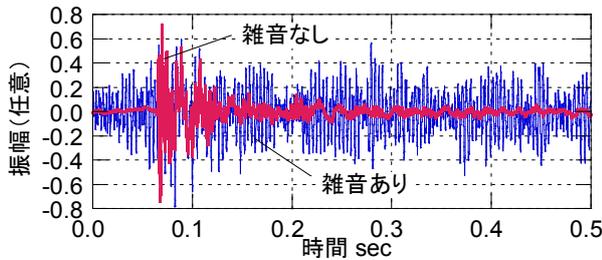


図-9 衝撃音を含む観測信号

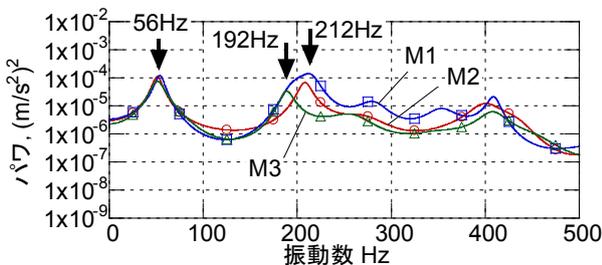


図-10 雑音が無い場合のパワースペクトル

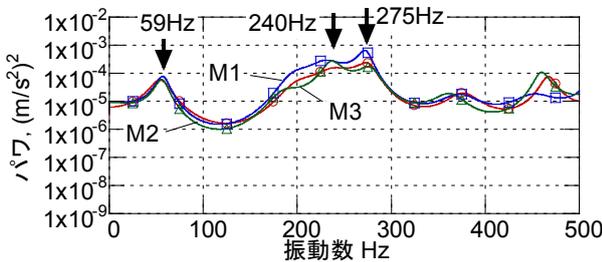


図-11 雑音がある場合のパワースペクトル

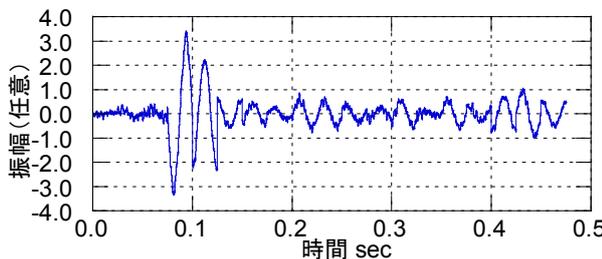


図-12 ICAによる打撃音の推定信号

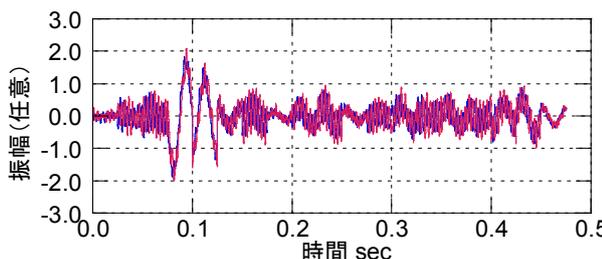


図-13 雑音成分の推定結果

一方、図-14には、推定された信号のパワースペクトルを示す。スペクトルに着目すると、打撃音と雑音の推定信号には、共通して50Hzのピークが存在するが、打撃音の推定信号のみ209Hzのピークが確認できる。また雑音の推定信号には284Hzのピークが確認できる。これは、ICAによる信号分離により、ローパスフィルタでは不可能であった帯域の波形を抽出できたことを意味している。

以上より、雑音が含まれる打撃音から固有振動数を推定する場合、ICAを適用することで、完全ではないものの効果的に推定が行えることがわかった。推定精度の向上には、打撃位置とマイクアレイ位置の最適化や、アルゴリズムの改良が必要と考えられる。

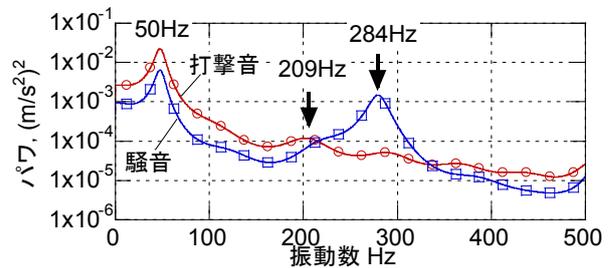


図-14 推定信号のパワースペクトル

2.5 ハンマーヘッドの影響

剛性が異なる二つのハンマーヘッドにより、RC梁を打撃し、応答特性を評価した。このとき中央下面に設置した加速度から得られたパワースペクトルを図-15に示す。当然ながらソフトヘッドに比べハードヘッドを用いた場合は高い周波数まで振動を励起できていることがわかる。またソフトヘッドで打撃した場合の打撃音から得られるパワースペクトルについて、人工雑音が無い場合を図-16に、雑音環境下で得られたものを図-17に示す。ソフトヘッドの特性として、入力波のゲインが100Hz以上で低下するため、200Hz付近のピークが認識できないことがわかる。しかし、53Hz付近に存在する一次のピークについては、雑音環境下でも検知できている。このことは、人工雑音を鋼板とパイププレートで発生させているため、240Hzから280Hzの高周波の雑音が大きく、低周波は比較的雑音の影響が少ないことに起因している。そのためアスファルトなど比較的剛性の低い層を介して打撃をした場合、打撃音から高周波の成分が得られにくいことがわかる。

また、ソフトハンマーにおける実験においても、ICAによる打撃音推定を行った。その結果、得られた波形を図-18に示す。図より、明確な分離が実行できていないことがわかる。これは、ソフトハンマーによる打撃音の継続時間に影響しているためと考えられる。すなわちソ

フトハンマーの場合、衝撃振動の減衰が大きく、騒音のパワーがすぐに消失してしまう。そのため、雑音中に混同される打撃音の非定常性が強くなり、正しく独立成分の推定が行えなかったと考えられる。このような場合は、連続的に打撃を加えるなどして、騒音中に含まれる打撃音の割合を高めるなどの工夫が必要と考えられる。

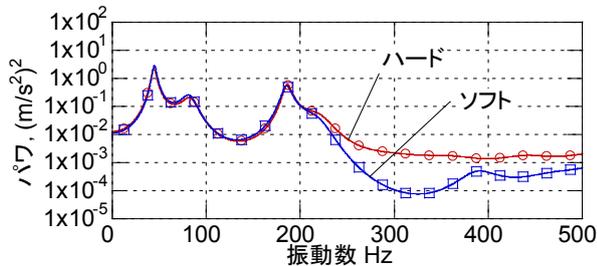


図-15 加速度計によるパワースペクトル（中央位置）

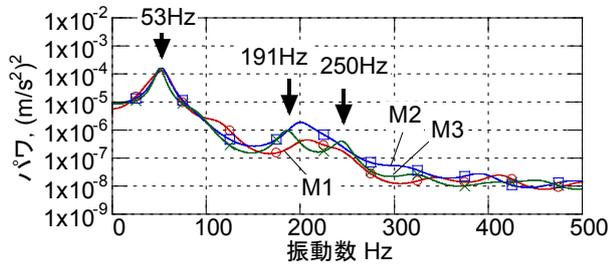


図-16 衝撃音によるパワースペクトル（ソフトヘッド：雑音なし）

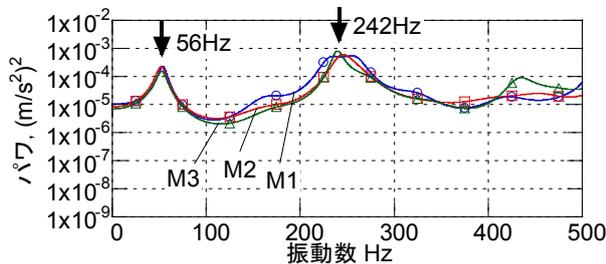


図-17 衝撃音によるパワースペクトル（ソフトヘッド：雑音あり）

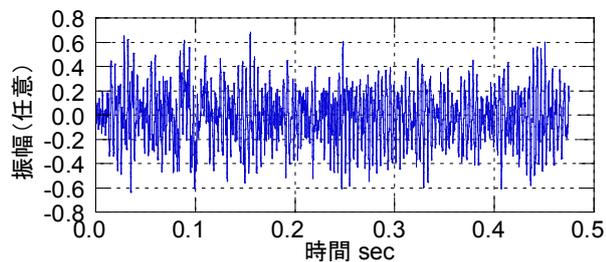


図-18 ICAによる打撃音の推定信号（ソフトヘッド）

3. まとめ

本研究では、雑音環境下での打撃音に基づく RC 部材の固有振動数の推定に関して基礎的な検討を行った。ここで得られた知見を以下に示す。

(1) 雑音の影響が小さい場合、ハンマー打撃により得られる打撃音から、RC 梁供試体の固有振動数を推定することが可能である。

(2) 騒音下で収録された打撃音から固有振動数を推定する場合、独立成分分析に基づく打撃音の推定が有効である。ただし、打撃音の帯域や持続時間によっては、正しく推定できないことがある。

以上より、独立成分分析を雑音除去に適用することは有用であると考えられるが、上記で指摘した問題点も明らかとなった。そのため、アレイの配置や収録条件などを精査し、今後も雑音除去の精度向上を検討していく予定である。その後、打撃音を走行しながら収録する走行車両の技術へと発展させていきたい。

謝辞 本研究の遂行にあたり、中淵大輔氏、桂木悠斗氏の協力を得た。ここに記し謝意を表する。

参考文献

- 1) 松井繁之：床版の技術開発，橋梁と基礎，vol.31/No.8，pp.84-94，1997.8
- 2) 橋梁マネジメント研究会：道路橋マネジメントの手引き，(財)海洋架橋・橋梁調査会，2004.8.
- 3) 松井繁之，前田幸雄：道路橋 RC 床版の劣化度判定法の一提案，土木学会論文集，No.374/I-6，pp.419-426，1986.10
- 4) 大西弘志，岡田裕昭，内田慎哉，鎌田敏郎：道路橋 RC 床版における疲労劣化と振動特性の関係に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.29，No.3，pp.1693-1698，2007.7.
- 5) 西村昭，藤井学，宮本文穂，加賀山泰一：橋梁の損傷評価における力学的挙動の有効性，土木学会論文集，No.380/I-7，pp.355-364，1987
- 6) 村田昇：入門独立成分分析，東京電機大学出版，2004.
- 7) 甘利俊一・村田 昇，独立成分分析，サイエンス社，2002.
- 8) A.Hyvarinen：Fast and Robust Fixed-Point Algorithms for Independent Component Analysis，IEEE Tans. on Neural Networks，10(3)，pp.626-634，1999.
- 9) E. Bingham and A.Hyvarinen：A fast fixed-point algorithm for independent component analysis of complex-valued signals，International Journal of Neural Systems，10(1)，pp.1-8，2000.
- 10) 猿渡洋，栗田悟史，武田一哉，板倉文忠，鹿野清宏：帯域分割型ICAとビームフォーミングを利用したブラインド音源分離，電気情報通信学会技術研究報告，電気通信学会，Vol.100，No.161，pp.1-8，2000.
- 11) 日野幹夫：スペクトル解析，朝倉書店，1986.