

モジュラー型ジョイントを有する道路橋の騒音特性

Characteristics of Noise Generated from Modular Joint in A Highway Bridge

山口宏樹^{1*}, 松本泰尚¹, 鵜野禎史², 廣本泰洋², 小澤亨²,
H. Yamaguchi¹, Y. Matsumoto¹, Y. Uno², Y. Hiromoto², T. Ozawa²,
富田直幹¹, 倉橋逸美¹, 和泉彰¹, アジズ ハキモフ¹
N. Tomida¹, I. Kurahashi¹, A. Izumi¹ and A. Hakimov¹

¹ 埼玉大学大学院 理工学研究科

Graduate School of Science and Engineering, Saitama University

² 川口金属工業株式会社

Kawaguchi Metal Industries Co., Ltd

Abstract

The field measurement of noise and vibration in a non-composite I-shaped steel-girder bridge with modular type expansion joint was conducted in order to investigate the characteristics and mechanism of the noise generated from the modular joint under a vehicle passage. The peculiarity of noise from modular joint is discussed in comparison with the noise from finger joint by paying attention to non-stationary phenomenon of the noise generation. The field measured data is compared also with the data from full-scale model experiment.

Key Words: modular type expansion joint, plate-girder highway bridge, field measurement, acoustic noise, vehicle-induced vibration

1. はじめに

近年、多径間橋や免震橋などにおいて多く採用されている道路橋モジュラー型エクспанションジョイント[1]では、一部において車両通過時に発生する固有の音が騒音問題として重要になっている。これまでの研究[2]-[4]から実物試験体レベルでの音響特性は解明されつつあるが、実橋梁の場合、スパン音に代表される、ジョイント以外の橋梁構造の影響を受けた連成的な騒音特性となることが考えられる。そこで、橋桁振動に起因した騒音や車両走行音

を含んだ実橋レベルでの道路橋モジュラー型ジョイントから発生する騒音の特性把握を目的として、騒音・振動の実橋計測を行った。

計測現場には、従来から広く使われている鋼製フィンガージョイントを有する道路橋が併設されていることから、本研究では、この騒音をも計測して、それとの比較でモジュラー型ジョイント特有の騒音特性を解明している[5]。また、騒音の間接的な原因である車両は、時間と共に橋梁上を移動しながら種々の振動を励起しているため、時間情報を考慮した周波数特性に着目することは、ジョイントの騒音や振動を的確に解明する上で非常に有効であることから、騒音・振動の計測試験データに対してウェ

* 〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255
電話・Fax: 048-858-3552
Email: hiroki@post.saitama-u.ac.jp

ープレット解析等の時間周波数解析法を適用し、車両通過時のジョイント及び橋梁構造における時間依存性を考慮した騒音特性の解明も試みている[6]。さらに、これまでの実物試験体による研究成果との比較によって、実橋条件におけるジョイント騒音の発生メカニズムをも考察した[7]。

2. 実橋における騒音・振動計測

実測対象橋梁はI鋼主桁を配した5径間連続非合成桁橋（橋長184.6m）であり、4主桁の新設橋にはモジュラー型ジョイント、5主桁の既設橋（新設橋に併設）には鋼製フィンガージョイントが設置されている（図1）。騒音計の設置位置は、ジョイント上部として橋梁上（ジョイント横）、ジョイント下部の音の把握を目的としてジョイント直下、桁下、橋梁脇の計4点とした（図2）。なお、橋梁脇の計測点は、桁下から橋軸直角方向に約5mの位置である。橋梁上（ジョイント横）の計測点はジョイントにより近い方が好ましいが、高速道路による実測ということで、安全面を考慮し図の位置とした。加速度計は、新設橋ではジョイントの水平・鉛直方向振動を、新設・既設両橋梁に対して床版、床版端部、主桁ウェブの振動を把握するために、構造に応じて適宜設置し計測を行った。

計測車両は、通常走行車両を、橋梁上（ジョイント横）騒音計測点に併設したビデオカメラによる情報をもとに整理した。車種は3種類（普通車、ワゴン車、トラック）に判別し、車種別での騒音特性の検討も行った。また、新設部測定中、既設部で車両が通過した際に、その影響が及ぶことが明らかであったため、計測対象橋梁を単独で走行するものを選定し評価を行った。車両通過位置は、できるだけ定量的な評価が行えるよう、車両走行車線を単独で通過するもののみを選定した。

計測結果は時系列波形として得られ（一例を図3に示す）、フーリエ変換により周波数成分へ変換した。なお、車種や速度などによって通過時間の異なるデータの解析となることから、平均化することに

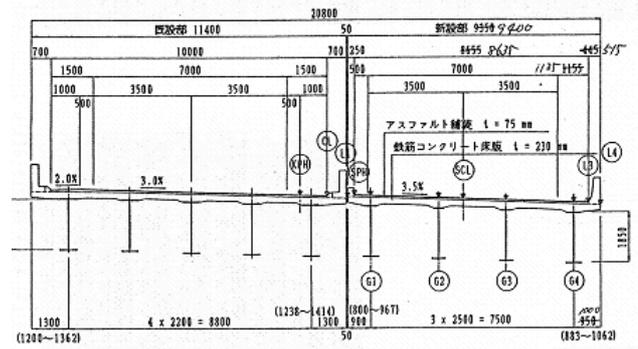


図1 実測対象橋梁の桁断面

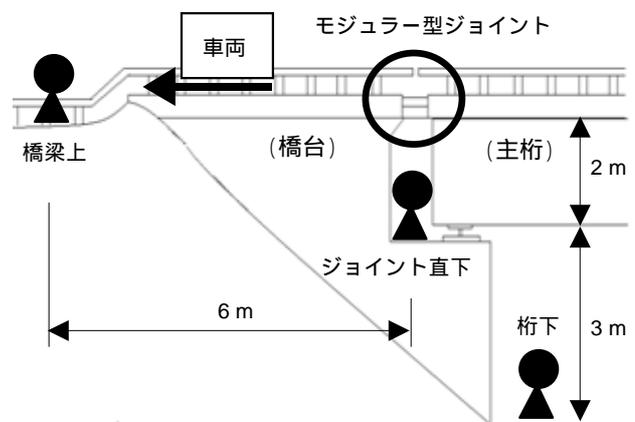


図2 実橋ジョイント付近での騒音計設置位置

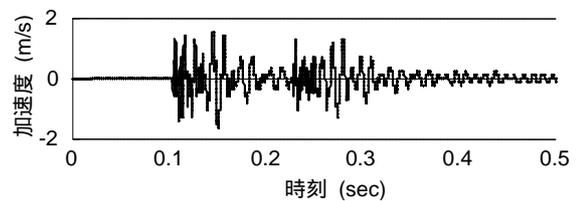


図3 トラック通過時の振動加速度時系列

より分解能を4.8 Hzに統一して評価を行った。また、データ長は時系列データより選定している。

3. フィンガー型との比較による騒音特性の解明

(1) 実橋から発生する騒音の特徴

騒音問題を対象とすることから、計測した音圧のスペクトルを求めた後に、人間の聴覚特性であるA特性補正を行ったデータで検討を行っている。A特性補正とは、低い周波数帯の音を聞き取りづらいという人間の性質から、周波数帯毎に定められた音圧を通常のスペクトルより低く示したものである。

モジュラー型ジョイントにおいては、ジョイント下部（ジョイント直下、桁下、橋梁脇）のそれぞれで違いはあるものの、ジョイントや主桁ウェブの振動応答に対応した、比較的低い周波数帯に顕著な卓越が複数認められた。また、図4に普通車走行時の桁下での騒音スペクトルを比較して示したが、モジュラー型ジョイントの音圧が、フィンガー型に比べて、顕著に大きく現れる傾向のあることがわかる。

ジョイント上部（橋梁上）の騒音については、図5に示すように、ジョイントの違いにより高周波数成分で大きな差異が見られる。モジュラー型での、この600～900 Hzにおける大きな騒音は止水ゴム空間の圧縮膨張音と考えられる。なお、全体的な音圧の大きさの違いは下部に比べて顕著ではない。

(2) 騒音問題となる音の特定

ジョイント下部では、A特性補正を行っているにもかかわらず、比較的低い振動数での複数の卓越が支配的であることから、最も重要な騒音であると言える。図6,7には車種の違いが桁下での騒音に及ぼす影響について示したが、加振力の大きいトラックと小さい普通車では振動応答レベルが異なり、変形自由度の大きいモジュラー型ジョイントで、ジョイントや主桁ウェブの振動に対応した低振動数域の卓越した騒音成分に明確な差異が見られる。

一方、ジョイント上部の騒音については、モジュラー型ジョイント特有の空間圧縮膨張音による、高周波数域での卓越成分が音圧も大きく問題であるといえる。車種の及ぼす影響については、卓越周波数帯に若干の差異が見られるとともに、その音圧は普通車のほうがトラックよりも大きい。

4. 騒音・振動の時間周波数特性の解明

(1) ウェーブレット解析

実測された騒音・振動時系列データ $f(x)$ に対して、式(1)で定義されるウェーブレット変換を行った。

$$(W_{\varphi} f)(b, a) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \varphi\left(\frac{x-b}{a}\right) f(x) dx \quad (1)$$

ウェーブレット解析は、基底関数 $\varphi(x)$ を時間的に局

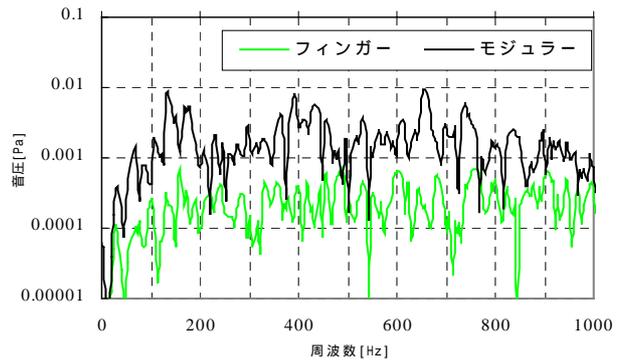


図4 ジョイントタイプの比較：
普通車、桁下での音圧スペクトル（A特性補正）

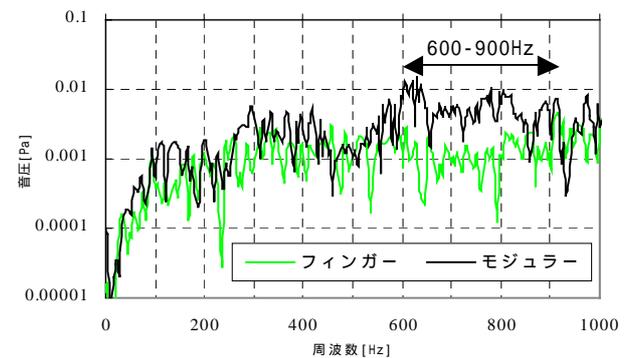


図5 ジョイントタイプの比較：
普通車、橋梁上での音圧スペクトル（A特性補正）

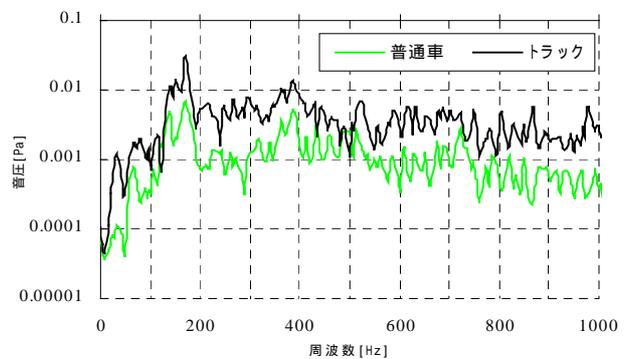


図6 車種の影響：モジュラー型ジョイント
桁下での音圧スペクトル（A特性補正）

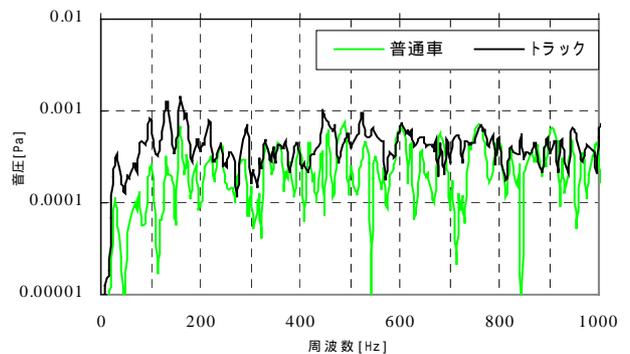


図7 車種の影響：フィンガー型ジョイント
桁下での音圧スペクトル（A特性補正）

在した関数として定義し、時間軸移動のパラメータ b と時間軸方向のスケール(周波数)パラメータ a を変化させて解析信号と相関を取り、相関の大小によりその時刻における信号の周波数成分を求めるという方法である。

(2) 橋梁上の音の時間周波数特性

図 8, 図 9, 図 10 に、橋梁上, 桁下, およびジョイント直下における車両通過時の音の時系列, ウェーブレットによる時間周波数プロットをそれぞれ示した。図 11, 図 12 はそれぞれウェブ振動, ジョイント振動を同様示したものである。ウェーブレットプロットの数値は無次元で、時間周波数プロットの色は赤いほど周波数成分は大きくなる。

図 8 の橋梁上の音は、車両走行によるノイズがかなり現れているが、ウェーブレットのプロットより、車両がジョイントを通過した際のジョイント音を明確に 2 回(前輪と後輪の進入に対応)捉えている。このジョイント音の発現時間は非常に短い。周波数で細かく見ると、200Hz 付近の音と 600Hz 以上の音の大きめに 2 分された周波数特性といえるが、比較的高い周波数の方(600Hz 以上)の音圧が大きい。ジョイント上ではモジュラー型ジョイントの構造の特徴上、400Hz 以上で止水ゴム空間からの空間圧縮音が出ることが分かっているので、高周波数音は空間圧縮音であるといえる。また、空間圧縮音は瞬間的に出る音なので、ジョイント音の発現時間が短いということにも対応している。

(3) 橋梁下の音の時間周波数特性

図 9 の桁下の音では、車両の前輪, 後輪がジョイントを通過する前, 通過する瞬間, 通過後に対応して、それぞれの騒音が明確に現れている。車両の通過による音は、主に 200Hz 付近の音が卓越しており、その他 400Hz 付近が大きく出ている。これらの音は車両通過後も比較的長く継続しており、減衰が小さい。図 11 の主桁ウェブ振動の時間周波数プロットと比較すると、200Hz 付近と 400Hz 付近の周波数で対応が取れ、減衰も小さい。よって、桁下の音はウェブの振動に大きく起因していると言える。

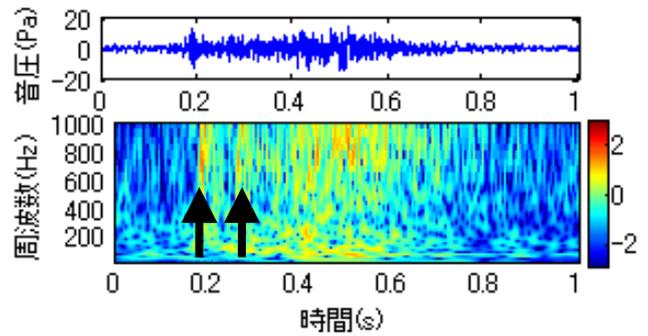


図 8 車両通過時の橋梁上騒音の時間周波数プロット

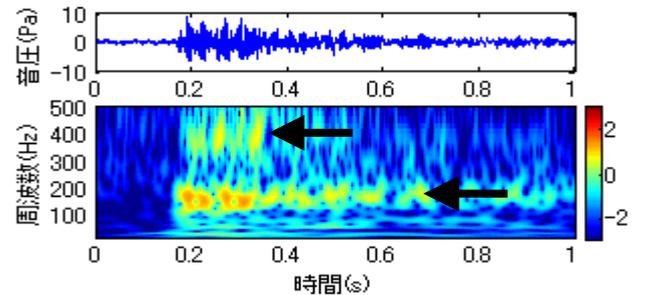


図 9 車両通過時の桁下騒音の時間周波数プロット

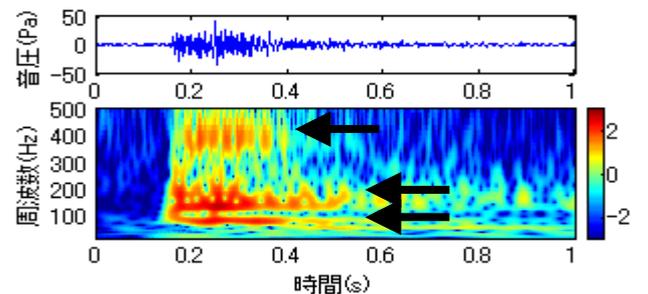


図 10 ジョイント直下騒音のウェーブレットプロット

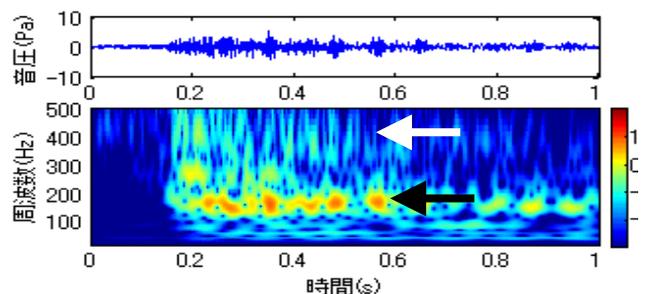


図 11 ウェブの振動のウェーブレットプロット

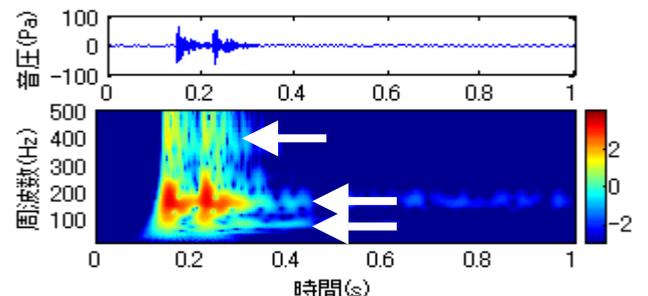


図 12 ジョイント振動のウェーブレットプロット

図 10 はジョイント直下の音の解析結果を示している。ジョイント直下では、桁下とほぼ同じ周波数成分が見られるが、車両通過直後の音圧が大きい。また、桁下ではあまり見られない 90Hz 付近に大きい成分の音も生じている。ジョイント直下の音を図 11 のウェブ振動、図 12 のジョイント振動の時間周波数プロットと比較すると、車両通過時と直後の大きな音はジョイント振動と周波数、減衰の大きさをほぼ対応が取れ、通過後の減衰の小さい振動数はウェブ振動と対応が取れている。

これら橋梁下 2 箇所の音を比較すると、ジョイント直下の音はジョイント振動とウェブ振動に起因していると考えられる。一方、桁下の音はジョイント振動に起因した 90Hz 付近の音は人間の聴覚特性を勘案するとあまり聞こえないことから、主桁ウェブの振動に起因した音の影響が大きいと言える。

5. モジュラー型ジョイント騒音の発生メカニズム

(1) 実物試験体における騒音発生メカニズム

図 13 に示すようなモジュラー型ジョイント実物試験体に対して行った実験の結果として、図 14 (a) に車両走行時のジョイント上・直下の音圧スペクトル、図 14(b)に振動加速度スペクトルを示す。ジョイント上で振動 500~800Hz に卓越音がみられ、500Hz 以下のジョイント上および直下の卓越音は振動との対応が見られる。図 15 に普通車タイヤと止水ゴム空間によって出来る気柱空間の応答倍率を示す。図から、500~800Hz で音が増幅されることが分かる。つまり、ジョイント上で卓越する 500~800Hz の音は、タイヤが乗り上げた際に止水ゴム空間内に圧力変動が発生し、気柱空間で増幅されて大きな音となる空間圧縮膨張音が原因であると言える。また、打撃試験により同定したジョイント固有振動形状と走行試験から得た振動形状が一致し(図 16)、ジョイント固有振動が車両により大きく励起されて大きな振動放射音になると結論できる。なお、140Hz などの卓越振動と対応しない音は、ジョイント下部の桁下空間を想定して設けた試験ピットの空間音

響特性により、音が増幅されていることも明らかとなった。

(2) 実橋における騒音発生メカニズム

実橋での車両走行時の音圧スペクトルを図 17(a)、ジョイント振動を図 17(b)、床版・ウェブの振動を図 17 (c)に示す。図から、車両走行時に 200Hz 以下および 700~900Hz に音の卓越が見られる。700~900Hz

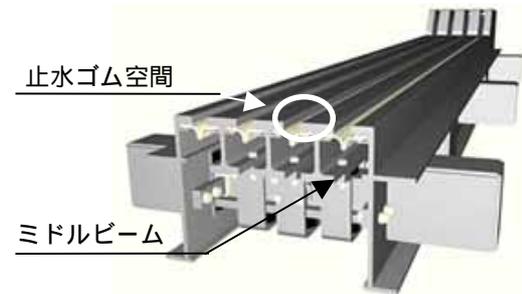


図 13 モジュラー型ジョイント

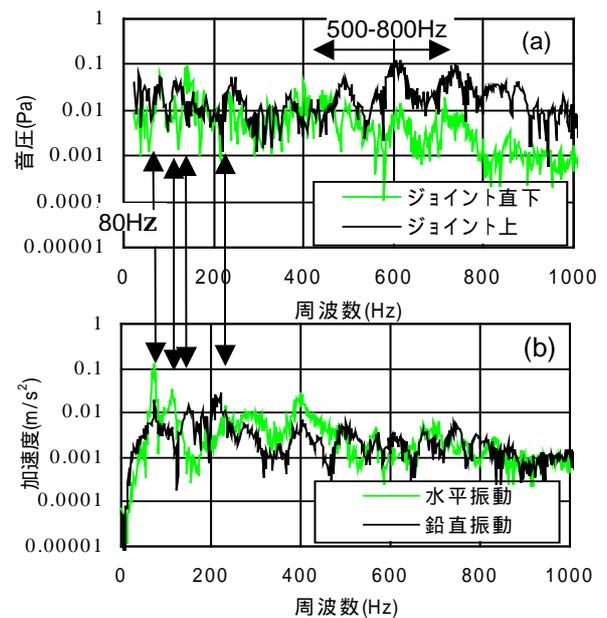


図 14 音圧・振動スペクトル
(a)ジョイント音 (b)ジョイント振動

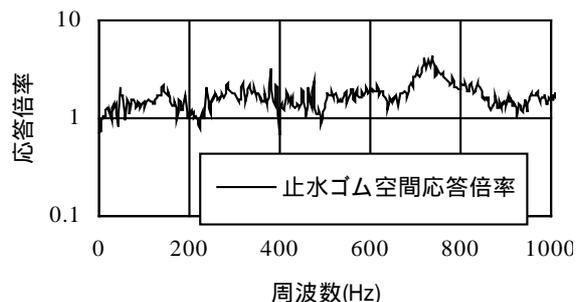


図 15 止水ゴム空間の応答倍率



図16 80Hzのジョイント水平振動形状

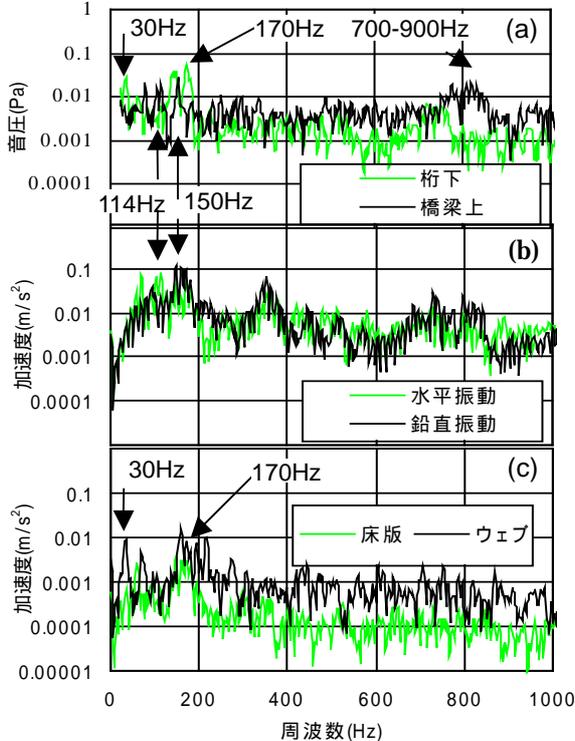


図17 実橋における音と振動：(a)車両走行時の音 (b)ジョイント振動 (c)床版・ウェブの振動

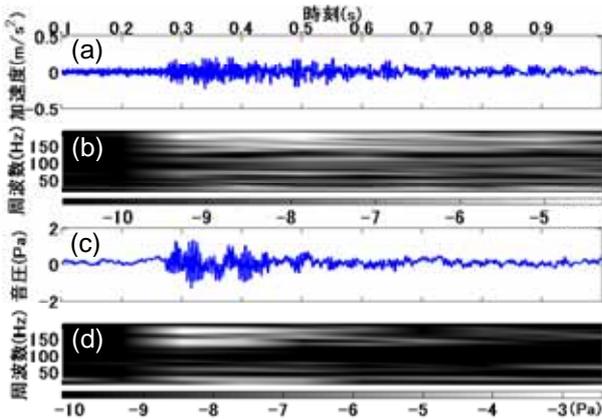


図18 時系列とランニングスペクトル

(a)(b) ウェブ振動応答 (c)(d) 桁下の音圧応答

の音は橋梁上のみで卓越していることから、空間圧縮音であると考えられるが、橋梁の変形の影響で試験体実験時よりも顕著ではない。114Hz, 150Hzの音はジョイント卓越振動と対応し、試験体実験と同様にジョイント振動放射音であると結論できる。

30Hz, 170Hzの卓越周波数成分については、ウェブの振動と桁下の音の時系列；図18(a)(c)と、ランニングスペクトル；図18(b)(d)（横軸は時刻、縦軸は周波数で、色が白に近いほど大きな加速度・音圧であることを示す）から考察を加えた。図より分かるように、0.28秒付近で車両がジョイントに進入し、170Hzの音と振動が発生し、車両通過後には減衰している。つまり、車両によりジョイントが振動し、ウェブを振動させることで170Hzの音が発生していると考えられる。一方、30Hzの音・振動は車両進入前から発生しているため、直接ジョイントに起因しているとは考えにくい。つまり、30Hzの音はスパン音であるといえるが、ジョイント上走行時に音が大きくなるため、スパン音とジョイント音の両方が発生しているといえる。

6. まとめ

モジュラー型ジョイントを有する鋼桁橋での騒音・振動を計測することによって、実橋レベルでの騒音特性を把握することができた。今後は、異なる形式の橋梁での計測試験を行い、モジュラー型ジョイント騒音の特性をより詳細に解明していく。

参考文献

- [1] Ramberger, G: Structural bearings and expansion joints for bridges, Structural Engineering Documents 6, IABSE, Zurich, Switzerland, 2002.
- [2] 山口宏樹他：道路橋モジュラー型エキスパンション・ジョイントの騒音発生メカニズムと騒音制御策，埼玉大学地域共同研究センター紀要，第5号，2004年度，pp.115-120，2005．
- [3] 松本泰尚他：モジュラー型エキスパンションジョイントの騒音発生源と騒音制御策に関する実験的研究，土木学会論文集，2006（投稿中）．
- [4] Ravshanovich K.A. et al.: Mechanism of noise generation from a modular expansion joint under vehicle passage, Engineering Structures, 2006 (under reviewing).
- [5] 倉橋逸美他：フィンガー型との比較によるモジュラー型ジョイントの騒音特性の解明，土木学会第61回年次講演会概要，I-165, 2006.
- [6] 和泉彰他：ウェーブレット解析によるモジュラー型ジョイント騒音の時間周波数特性の解明，土木学会第61回年次講演会概要，I-483, 2006.
- [7] 富田直幹他：道路橋モジュラー型ジョイントの騒音発生メカニズムの解明，土木学会第61回年次講演会概要，I-480, 2006.