

論文

RC 床版に対する小型 FWD 試験で得られる振動加速度の特性に関する検討

木村延久*, 大西弘志**, 大内皓平***, 八重樫大樹*

*岩手大学大学院, 総合科学研究科修士課程地域創生専攻 (〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5)

**博士 (工学), 岩手大学准教授, 理工学部システム創生工学科 (〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5)

***修士 (工学) JFE エンジニアリング株式会社 (〒100-0005 東京都千代田区丸の内 1-8-1)

通常, 道路橋の定期点検では床版の健全度を調査する方法として橋梁点検車を用いた近接目視点検や打音検査などが実施されている. これらの手法では時間や労力, コストがかかる上, 床版内の水平ひび割れの有無を確認できない等, 床版の状態を総合的に評価するには技術的な課題があると思われる. そこで, 本論文では既設橋の RC 床版を対象に実施した小型 FWD 試験によって得られる指標の一つである加速度についてどのような特性がみられるのか検討を行った.

キーワード: 維持管理, RC 床版, 小型 FWD, 衝撃振動試験

1. はじめに

1.1 背景

我が国において橋梁は, 河川や鉄道などで隔てられた地域を結び, 快適な道路ネットワークを形成する社会生活や産業活動にかかせない社会基盤として発達してきた. 全国に 2m 以上の橋梁はおよそ 70 万橋¹⁾あり, その多くが高度経済成長期に整備されたものである. 建設後 50 年を超えた 2m 以上の橋梁の割合は, 2013 年現在は 18%であるが, 10 年後には 43%, 20 年後には 67%へと増加する. 国土交通省が所管する社会資本の維持管理・更新費は, 現在の技術や仕組みによる維持管理状況がおおむね継続すると仮定すると, 2013 年度には約 3.6 兆円であったものが, 20 年後には約 4.6~5.5 兆円になるものと試算されている²⁾. 既存の社会資本の安全確保と維持管理・更新に係るトータルコストの縮減・平準化の両立が必要となっている.

床版は自動車荷重を直接支持するため疲労による損傷が生じやすく, 床版下面のひび割れ, 水平ひび割れ, 押し抜きせん断破壊などとして損傷が現れる. 現在床版の健全度の評価方法は, 橋梁点検車を用いた床版裏側の目視点検や打音点検による浮きや剥離状態の調査, 車両載荷試験などによるたわみの検討が有効である. しかし, 目視点検や打音点検は熟練した技術者を必要とし, また車両載荷試験は多大な労力と経費が必要不可欠であるため, 増えつつある老朽化橋梁すべてに適用することは難しい. このような状況から従来の載荷試験に代わる, より簡易で経済的, 客観的な健全度評価手法の確立が必要となっている.

1.2 本研究の目的

本研究では道路橋床版を対象とした簡易的載荷試験方法として FWD (Falling Weight Deflectometer) に着目した. FWD は従来, 舗装・地盤等に対する構造評価に用いられている衝撃振動試験であり, 現在では橋梁の健全度評価への活用に関して様々な研究が行われている³⁾.

本研究では実橋床版において, より簡易的に使用できる小型 FWD を用いた衝撃振動試験を行った. 小型 FWD を用いた衝撃振動試験では, 加速度計を併用することにより, 衝撃加振時の応答加速度波形を計測した. 本論文では計測された加速度のデータの比較から床版の動的特性を明らかにし, 床版の状態の評価が可能か検討を行った.

2. 小型 FWD 試験

2.1 FWD 概要

FWD とは, 載荷板上に重錘を自由落下させることにより衝撃荷重を加え, これにより生じるたわみを複数点で同時に測定する装置であり, FWD 試験はそれらの装置を用いた試験のことを指す. 複数点で同時にたわみ量を測定するため, 路面のたわみ形状を得ることができる.

FWD 試験の特徴として, 非破壊で舗装を傷つけることがない, 従来のたわみ量測定に比べて短時間の計測が可能であるなどが挙げられる. 測定したたわみ量やたわみ形状から, 舗装各層の強度や支持力などを推定し, 舗装の健全度が判定することができる.



図-1 小型 FWD 試験実施状況

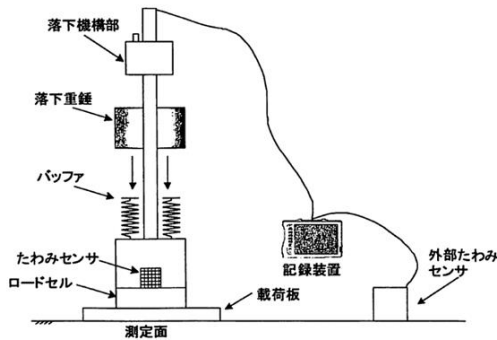


図-2 小型 FWD 構成例⁶⁾

2.2 小型 FWD 試験機

本試験で用いた試験機は TML 式小型 FWD システム「FWD-Light」であり、本システムは、小型 FWD 本体の重錘を自由落下させ、そのときの衝撃荷重値と変位を内蔵している荷重計と加速度計を用いて測定する。変位量は加速度計の測定値を独自の自動化処理で求めており、高精度の結果を得ることができる。また、外部変位センサを用いることにより最大 4 点までの外部変位を同時に測定することが可能である。小型 FWD 試験機の特徴として、小型軽量で可搬性に優れている、短時間で多数点での測定が可能であることが挙げられる。以上の特徴より従来方法と比べて簡易的に測定を行うことができると思われる。図-1 に小型 FWD 試験実施状況を、図-2 に小型 FWD の構成例を示す。

今回の試験では小型 FWD システムとは別にサーボ式加速度計を同時に用いることにより、小型 FWD 試験機による衝撃発生時の振動を測定した。この加速度計を 9 台用いて応答加速度波形を測定した。図-3 に加速度計の外観を示す。

2.3 対象橋梁

調査対象とした既設橋は岩手県胆沢郡金ヶ崎町の跨川道路橋である。表-1 に既設橋の橋梁諸元、図-3 に橋梁全景、図-4 に一般図を示す。供用開始は 1974 年である。橋梁形式は上部工が鋼単純合成 H 桁橋、下部工が逆 T 式橋台である。橋長は 20.0m、全幅は 6.3m である。



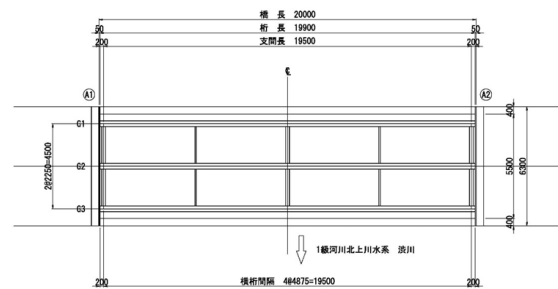
図-3 サーボ式加速度計

表-1 既設橋諸元

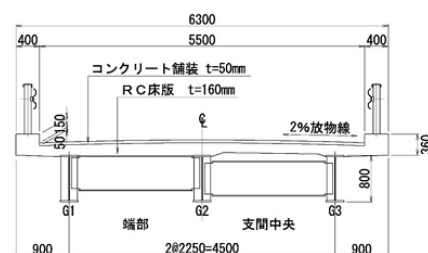
構造形式	鋼単純合成 H 桁+逆 T 式橋台
竣工年	昭和 49 年 3 月
基礎形式	直接基礎
設計基準	昭和 37 年道路橋示方書
活荷重	TL-14
橋長	20.000m (桁長 19.900m)
支間長	19.500m
幅員構成	0.400+5.500+0.400=6.300m
支承形式	鋼線支承
床版形式	RC 床版 t=16cm
舗装形式	コンクリート舗装 t=5cm
補修履歴	なし



図-4 既設橋外観



(a) 平面図



(b) 断面図

図-4 既設橋一般図

床版はRC床版であり、床版厚さは160mm、舗装はコンクリート舗装である。本橋梁は2011年に橋梁点検が行われており、主桁や横桁に大きな損傷は見受けられなかった。

2.4 試験手法

既設橋における小型FWD試験は2パターンでの計測を行った。各パターンから床版の挙動を把握する。各パターン共通に重錘重さを25kg、落下高さを1.0m、载荷版直径を200mmに設定し計測を行った。また、落下高さ1.0mでの衝撃荷重は約30kN程度であり、加速度計の感度方向は床版の面に対して鉛直方向である。

3. 加速度計測結果

3.1 高速フーリエ変換 (FFT)

計測した加速度は、橋梁の動的特性の把握を行うことを目的として高速フーリエ変換を行いフーリエスペクトル及び位相スペクトルを得た。橋梁全体系計測では、サンプリング間隔0.2ms、データ数16,384個、パネル系計測では、サンプリング間隔0.1ms、データ数16,384個としFFTを行った。

3.2 橋梁全体系計測

橋梁全体系計測では主桁上部の地点を打撃し、橋梁全体の挙動を計測するパターンである。打撃点及び加速度計の配置を図-5に示す。打撃点は各主桁の支間1/4点、1/2点（支間中央）であり、計6箇所について計測を行い、打撃点毎に計測名をG-1-1～G-3-2とした。また加速度計の設置位置は図に示すように、支間の1/4点、1/2点及び3/4点の各種主桁3箇所ずつ、計9箇所に配置した。

橋梁全体系計測では支間1/4点と支間中央で計測した結果では明瞭な差を確認している。そのため打撃点”G1-1、G2-1、G3-1”と”G1-2、G2-2、G3-2”に分けて結果の分析を行う。

(1) 支間中央 G1-2、G2-2、G3-2 でのフーリエスペクトル、位相スペクトル

図-6はG1桁1/2点を打撃した際の打撃点におけるフーリエスペクトル及び、位相スペクトルを示す。振幅スペクトルが複数存在するため、振幅が卓越し、位相スペクトルが $270^{\circ}(-90^{\circ})$ を示す振動数を基本とした⁷⁾。この結果、6.5Hzと7.5Hzがピーク振動数と判断できる。

図-7はG2桁1/2点を打撃した際の打撃点におけるフーリエスペクトル及び、位相スペクトルを示す。同様に位相スペクトルが $270^{\circ}(-90^{\circ})$ を示す周波数に着目すると、6.5Hzのみがピーク振動数と判断された。表-2に各桁支間中央におけるピーク振動数を示す。

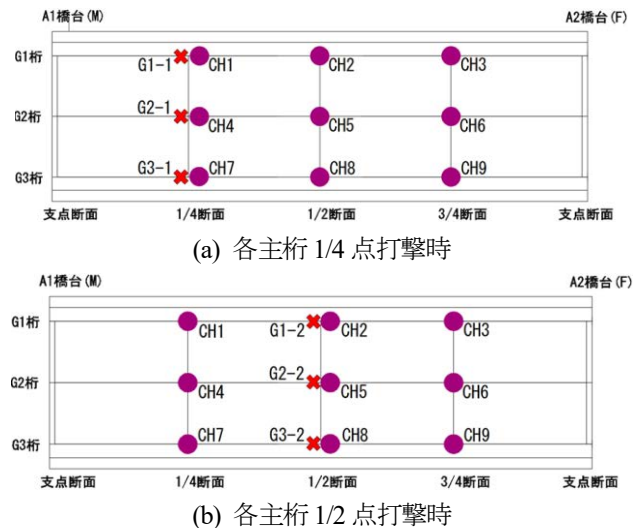
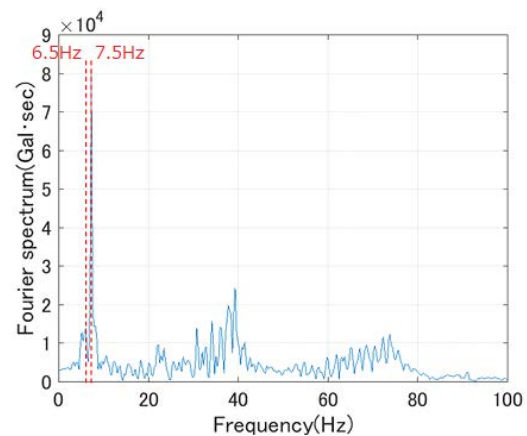
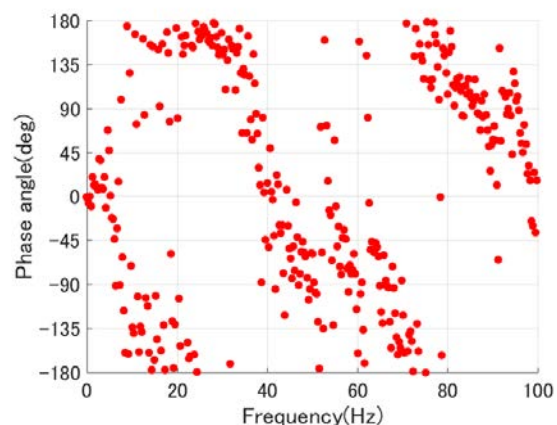


図-5 打撃点及び加速度計配置図（全体系計測）



(a) フーリエスペクトル



(b) 位相スペクトル

図-6 G1-2における各スペクトル

表-2 各桁支間中央におけるピーク振動数

主桁	ピーク振動数(Hz)
G1桁	6.5, 7.5
G2桁	6.5
G3桁	6.5, 7.5

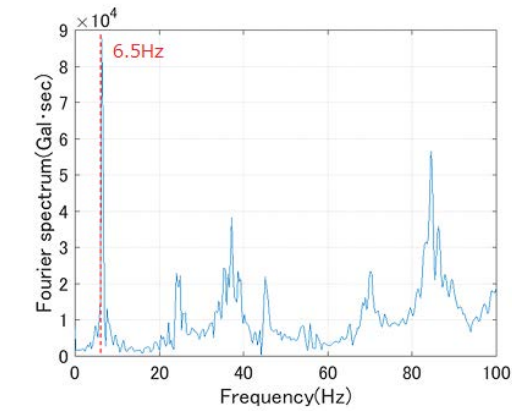


図-7 G2-2における各スペクトル

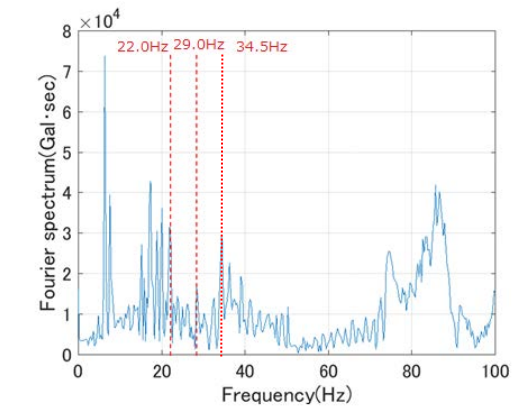


図-8 G3-1における各スペクトル

支間中央を打撃した際には、一般に1次振動モードが計測される。また、曲げ1次モードにおいてはすべての主桁が支間中央においてピークを示し、ねじれ1次モードにおいては、G1桁、G3桁の支間中央においてピークを示す。よって、すべての主桁上で計測された6.5Hzは曲げ1次モード、G2桁のみで計測されなかった7.5Hzはねじれ1次モードであると考えられる。

(2)支間1/4点 G1-1, G2-1, G3-1 でのフーリエスペクトル, 位相スペクトル

図-8は、G3桁1/4点を打撃した際の1/4点におけるフーリエスペクトル及び、位相スペクトルを示す。前述の通り、振幅が卓越し位相スペクトルが270°(-90°)を示す振動数を基本とした。この結果、22.0Hz, 29.0Hz, 34.5Hzがピーク振動数と判断できる。

図-9は、G2桁1/4点を打撃した際の1/4点におけるフーリエスペクトル及び、位相スペクトルを示す。同様に位相スペクトルが270°(-90°)を示す周波数に着目すると、29.5Hz, 40.0Hzがピーク振動数と判断された。表-3に各桁支間1/4点, 3/4点におけるピーク振動数を示す。

支間1/4点を打撃した際には、一般に2次振動モードが計測される。また、曲げ2次モードにおいてはすべての主桁が支間1/4点及び3/4点においてピークを示し、ねじれ2次モードにおいては、G1桁、G3桁の支間1/4

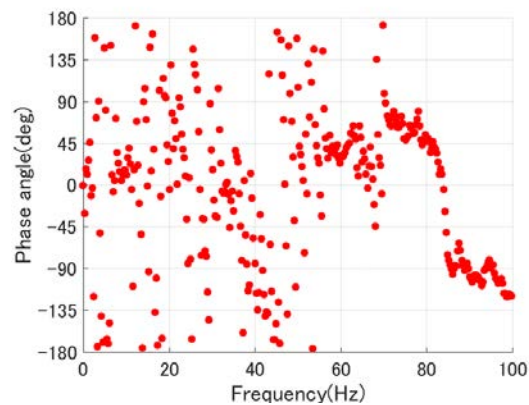
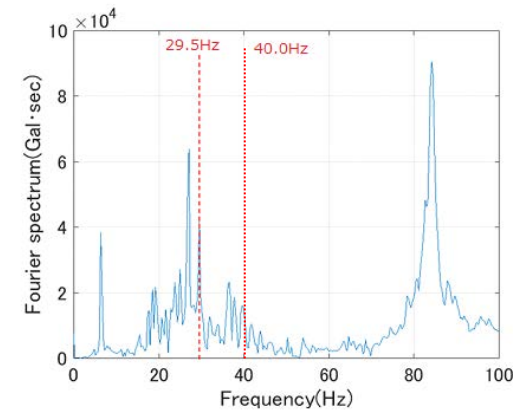


図-9 G2-1における各スペクトル

表-3 各桁支間 1/4, 3/4 点におけるピーク振動数

測定位置	ピーク振動数(Hz)
G1 桁 1/4 点	22.0, 29.5, 40.0
G1 桁 3/4 点	22.0, 29.5, 34.5
G2 桁 1/4 点	29.5, 40.0
G2 桁 3/4 点	29.5
G3 桁 1/4 点	22.0, 29.0, 34.5
G3 桁 3/4 点	22.0, 29.0, 34.5

表-4 検討範囲①での卓越振動数

測定位置	卓越振動数 (Hz)
パネル①CH9 (計測範囲 中心点)	6.5, 29.0, 38.5 46.5, 48.0, 60.5
パネル②CH6 (計測範囲 中心点)	10.0, 29.0, 46.5, 73.5
パネル①CH3 (計測範囲 1/4 点)	5.5, 14.5, 17.5 65.0, 68.5
パネル②CH3 (計測範囲 3/4 点)	22.0, 46.5, 63.5, 85.5

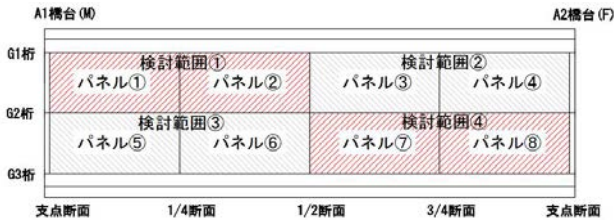


図-10 固有振動数の検討範囲

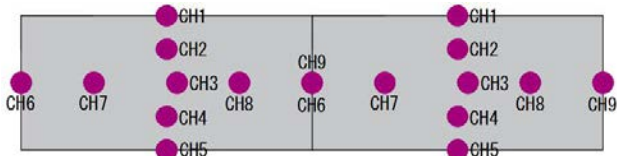


図-11 各検討範囲における加速度計配置図

点及び 3/4 点においてピークを示すと考えられる。よって、すべての主桁上で計測された 29.0Hz または 29.5Hz が曲げ 2 次モードであると考えられる。また、G1 桁 1/4 点でのみ計測されなかったが、それ以外の支間 1/4, 3/4 点で計測された 34.5Hz はねじれ 2 次モードである可能性が高い。

以上より、小型 FWD 試験によって橋梁のおおよその固有振動数を測定し振動モードを推定できる可能性があると考えられる。

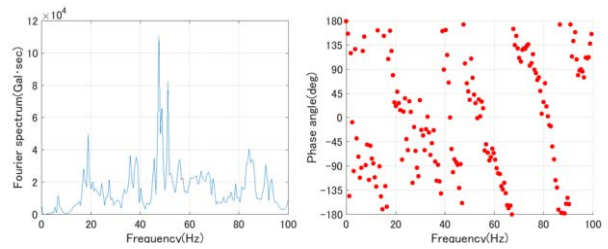
3.3 パネル系計測

パネル系計測では、床版を主桁と横桁で囲まれた範囲を 1 計測範囲 (パネル) とした。

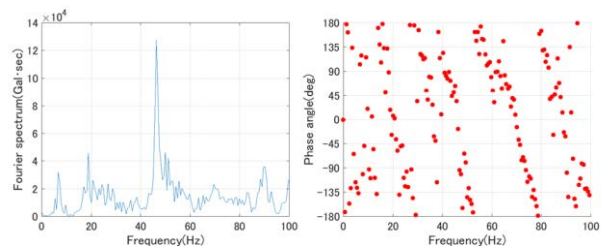
1/4 点及び 3/4 点の横桁は床版に接触しておらず、主桁と端部横桁及び中間横桁に囲まれた範囲が 1 つのパネルとして挙動する可能性がある。そこで、パネル①と②、パネル③と④、パネル⑤と⑥、パネル⑦と⑧を、それぞれ一体のパネルとみなし、各検討範囲に対して固有振動数の検討を行った。図-10 に検討範囲を、図-11 に検討範囲における加速度計配置図を示す。

検討範囲①の中心、1/4 点、3/4 点における卓越振動数を表-4 に示す。また、検討範囲①の各測定点におけるフーリエスペクトル及び位相スペクトルを図-12 に示す。

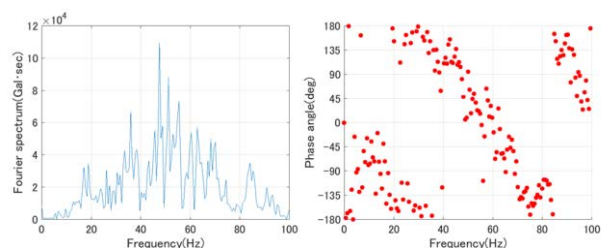
はじめに、検討範囲①における曲げ 1 次モードについて



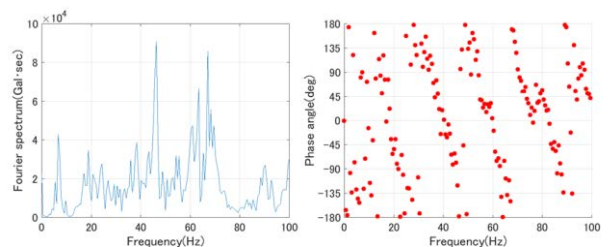
(a) パネル① CH9



(b) パネル② CH6



(c) パネル① CH3



(d) パネル② CH3

図-12 検討範囲①の各測定点におけるフーリエ・位相スペクトル

表-5 検討範囲②での卓越振動数

測定位置	卓越振動数 (Hz)
パネル③CH9 (計測範囲 中心点)	7.0, 11.0, 22.0 46.5, 52.5
パネル④CH6 (計測範囲 中心点)	13.0, 38.0, 46.5, 72.5
パネル③CH3 (計測範囲 1/4 点)	9.5, 15.5, 31.5 64.5, 86.5, 93.0
パネル④CH3 (計測範囲 3/4 点)	23.0, 64.5, 67.5 72.5, 74.0, 79.0

表-6 検討範囲③での卓越振動数

測定位置	卓越振動数 (Hz)
パネル⑤CH9 (計測範囲 中心点)	16.5, 24.5, 46.5 67.5, 86.5
パネル⑥CH6 (計測範囲 中心点)	20.0, 48.0, 58.0, 81.5
パネル⑤CH3 (計測範囲 1/4 点)	12.5, 26.0, 63.5 70.0, 82.0
パネル⑥CH3 (計測範囲 3/4 点)	17.5, 23.0, 27.0 48.0, 63.5, 87.0

て検討する。ほとんどの検討範囲の中心点において46.5Hzに卓越振動数が見られたため、46.5Hzが曲げ1次モードである可能性がある。

次に、検討範囲①における曲げ2次モードについて検討する。各検討範囲の1/4点と3/4点では、63.5～68.5Hz付近において共通の卓越振動数が見られた。曲げ1次モードとみられる46.5Hzより高次で卓越している63.5～68.5Hz付近に曲げ2次モードが存在する可能性がある。

また、検討範囲②～④における卓越振動数を表-5、表-6、表-7に示す。いずれの検討範囲においてもほぼ同様の卓越振動数を示していることから、既設橋の床版には局所的な損傷は発生していない、もしくは床版全体が同様に損傷したと考えられる。

4. 結論

本論文では、小型FWDを用いた衝撃振動試験による道路橋床版健全度評価手法に関する研究として、試験によって得られたデータの分析、道路橋床版の挙動に関する検討を行った。以下に本研究で得られた知見を述べる。

- (1) 小型FWDならびに加速度計を用いた衝撃振動試験の加速度データの比較により、上部工全体及び床版のおおよその固有振動数を明らかにすることが可能である。
- (2) 既設橋の床版の固有振動モードは、いずれの検討範囲においてもほぼ同様の値を示したことから、床版に大きな損傷は発生していない、もしくは床版全体が同様に損傷した可能性が高い。
- (3) 床版に損傷がある場合は、固有振動モードが他の計測箇所やモーダル解析の結果と異なる値を示すと考えられる。床版の固有振動モードを明らかにすることで、損傷箇所をある程度絞ることが出来る可能性がある。

今回、加速度波形に対して得た位相スペクトルであるが、本来であれば点が連なり曲線状に現れるはずが、ある程度のばらつきを持って現れた。これは、加速度波形に重錘の複数回のバウンド等に起因するノイズが混入しているためと考えられる。今後の課題として、これら

表-7 検討範囲④での卓越振動数

測定位置	卓越振動数 (Hz)
パネル⑦CH9 (計測範囲 中心点)	43.5, 48.0, 50.5 52.5, 71.0, 75.5
パネル⑧CH6 (計測範囲 中心点)	38.5, 46.5, 74.0
パネル⑦CH3 (計測範囲 1/4 点)	21.5, 48.0, 66.0
パネル⑧CH3 (計測範囲 3/4 点)	37.0, 42.5, 67.0

のノイズが少なくなる実験方法、または定量的なノイズの除去手法に関するさらなる検討が必要である。

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所：平成19年度道路構造物に関する基本データ集，国土技術政策総合研究所資料第488号，2008.12
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所：橋梁の架替に関する調査結果（IV），国土技術政策総合研究所資料第444号，2008.4
- 3) 国土交通省：平成28年度国土交通白書，2016
- 4) 土木学会舗装工学委員会：FWDおよび小型FWD運用の手引，2002.12
- 5) 山口恭平，早坂洋平，曾田信雄，大西弘志：FWDを用いた既設RC床版の健全度評価手法に関する一提案，構造工学論文集，Vol.61A，2015.3
- 6) 関口幹夫，國府勝郎：FWDによる床版の健全度評価手法の検討，構造工学論文集，Vol.50A，pp.120-126，2003
- 7) 羽矢洋：衝撃振動試験法による鉄道橋梁下部構造物の健全度診断，機関誌「非破壊検査」，Vol.46，No.1，2008.1

(2018年7月20日受付)