

## 論文

## 小型 FWD 試験機を用いた小規模橋梁床版の構造特性評価

八重樫大樹\*, 大西弘志\*\*, 岩崎正二\*\*\*, 千葉陽子\*\*\*\*, 石川遼祐\*\*\*\*\*, 木村如水\*\*\*\*\*

\*修(工), 株式会社昭和土木設計, コンサルタント事業部 (〒020-0891 岩手県紫波郡矢巾町流通センター南 4 丁目 1 番 23 号)

\*\*博(工), 岩手大学教授, 理工学部システム創成工学科 (〒020-8551 岩手県盛岡市上田四丁目 3-5)

\*\*\*博(工), 株式会社昭和土木設計, コンサルタント事業部 (〒020-0891 岩手県紫波郡矢巾町流通センター南 4 丁目 1 番 23 号)

\*\*\*\*山形県立産業技術短期大学校教授, 土木エンジニアリング科 (〒990-2474 山形県山形市松栄 2 丁目 2-1)

\*\*\*\*\*岩手大学大学院, 総合科学研究科 (〒020-8551 岩手県盛岡市上田四丁目 3-5)

本研究では岩手県内で供用されている小規模橋梁に, 小型 FWD 試験機による重錘落下試験を実施した. 床版上の加速度計の配置として全体的なものと同所的なものを組み合わせることにより, 橋梁の全体系や床版の部材としての振動特性を調査した. また, 対象橋梁の可動支承に並進及び回転のバネモデルを導入した 3 次元 FEM モデルを作成し, このモデルによる固有値解析の結果との比較により, 対象橋梁の構造特性について検討した.

キーワード: 小型 FWD 試験, 橋梁床版, 振動特性評価, FEM 固有値解析

## 1. まえがき

橋梁床版に対して従来行われている健全度評価手法には目視調査や打音点検, 車両載荷試験などがある. しかし, 目視点検や打音調査は, 点検者の経験的判断に依る側面が大きく, 定量的な評価手法としては課題がある. また, 車両載荷試験は交通止めを行う必要がある上, 多大な労力と経費を要し, すべての橋梁に適用することは実際的ではない.

このような状況を改善するために, 本研究では小規模橋梁床版に対する簡易的な調査手法として小型 FWD (Falling Weight Deflectometer) 試験機(図-1)を用いた衝撃振動試験に着目した. FWD 試験は従来道路舗装に対する健全度評価に用いられている衝撃載荷試験であり, 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<sup>1)2)</sup>. 特に, 小型 FWD 試験機は可搬性に優れ, 短時間で多数点での測定が可能であることから, 小規模橋梁および床版の振動特性評価に利用することができる.

本研究では小規模橋梁に小型 FWD 試験機を用いた衝撃振動試験を行い, 得られた加速度波形に FFT



図-1 小型 FWD 試験機

(高速フーリエ変換)を施し, 対象橋梁の固有振動数を抽出した. 3 次元 FEM により対象橋梁をモデル化し, 固有値解析との比較によって構造特性の推定を試みた.

## 2. 試験概要

## 2.1 対象橋梁

本研究の対象橋梁は, 岩手県胆沢群金ヶ崎町の渋川に架かる跨川道路橋, 下渋川橋である(架設年: 1974 年). 本橋梁は, 主要道から離れているため,

交通量は少ない。表-1 に橋梁諸元を示す。本実験までに塗装塗替え等の補修・補強等が行われていない。目視点検の結果、コンクリート舗装に凹凸やうきがみられたが、床版、橋台のコンクリート部材や鋼桁に著しい損傷は認められず、おおむね健全な状態であった。図-2(a), (b), (c)に、それぞれ対象橋梁の側面図、平面図、上部工断面図を示す。また、コンクリート舗装表面の損傷位置を図-3 に示す。舗装の損傷については、後述する FEM 解析モデルでは床版全体の剛性低下で表現している。

表-1 橋梁諸元

項目	内容
上部工形式	鋼単純合成H桁橋
下部工形式	逆T式橋台
基礎形式	直接基礎
床版形式	RC床版 (t=160mm)
支承形式	鋼線支承
橋長	20,000 mm
支間長	19,500 mm
幅員構成	400+5,500+400=6,300
設計荷重	TL-14

## 2.2 小型 FWD 試験機

FWD 試験とは試験機に内蔵されている重錘を計測対象部位に落下させることにより衝撃力を与え、加力時の変形を計測する衝撃載荷試験である。今回の計測で用いた試験機は、小型で可搬性に優れ多点計測が可能な FWD-Light (KFD-100A) である。

## 2.3 加速度計

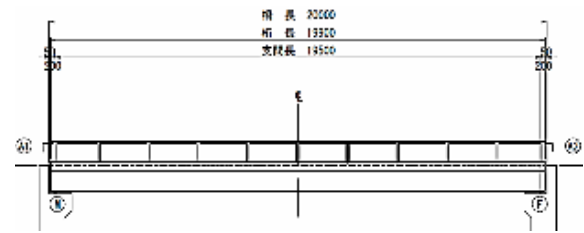
今回の試験では、小型 FWD 試験機による重錘落下によって生じる鉛直方向の加速度を、サーボ式加速度計 (LS-10C) を用いて計測し、マルチレコーダ (TMR-200) を用いて記録した。

## 2.4 計測方法

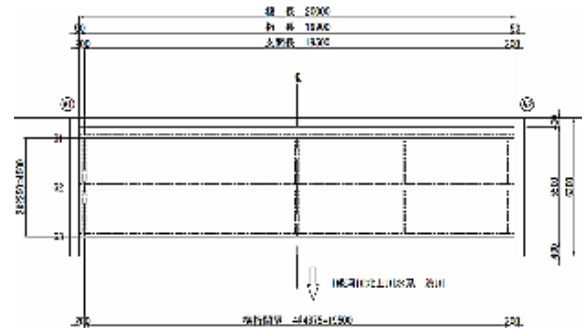
試験は橋梁全体系と床版パネル系の 2 通りの载荷パターンにより行った。各パターンとも重錘の質量は 25 kg, 落下高さは 1.0 m に設定し、計測を行った。

### (1) 橋梁全体系計測

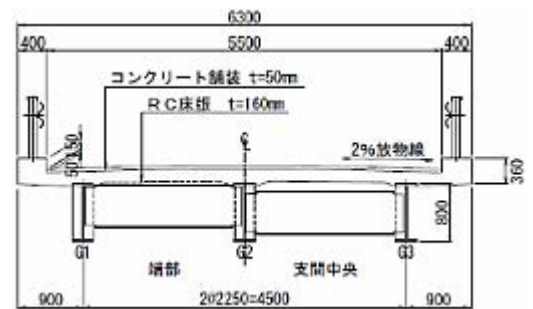
各主桁それぞれの支間 1/2 点および支間 1/4 点の床版上を計 6 箇所打撃し、計測を行った。また加速度計は各主桁の支間 1/4 点、1/2 点及び 3/4 点の床版上に計 9 箇所配置した(図-4)。



(a) 側面図



(b) 平面図



(c) 上部工断面図

図-2 対象橋梁図

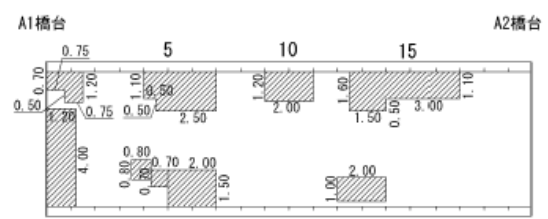


図-3 コンクリート舗装の損傷位置図

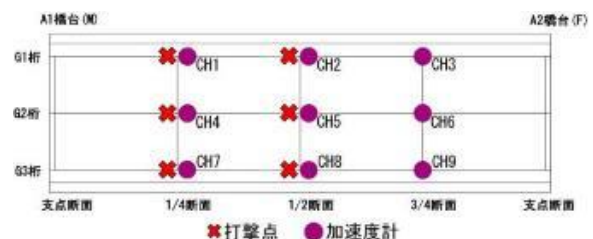


図-4 橋梁全体系計測

## (2) 床版パネル系計測

床版の主桁と横桁で囲まれた範囲を 1 計測範囲 (パネル) とし、計 8 パネルについて測定を行った (図-5(a))。打撃点はパネル中央とし、加速度計は図-5(b)に示すように、打撃点を含めて橋軸方向および橋軸直角軸回りにパネルを均等に 4 分割するように配置した。

## 3. 小型 FWD 試験結果と考察

### 3.1 橋梁全体系計測

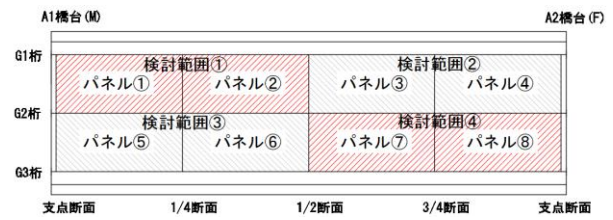
小型 FWD 試験による支間 1/2, 1/4 点打撃時の加速度波形とその振幅スペクトルの代表例をそれぞれ図-6, 7に示す。データトリガ機能により、打撃開始が 1.0 秒として計測される。打撃点では、重錘による加速度振幅の最大値はおよそ 1500~3000 gal が打撃直後に生じ、その後急激に減衰している。ただし、重錘が複数回バウンドすることにより、打撃から約 0.6 秒後以降にも微弱な振動が捉えられている。得られた加速度波形に FFT (高速フーリエ変換) を施し、振幅スペクトルから卓越周波数を求めた。FFT のデータ数は 16384 個、時間刻みは 0.2 ms である。

各主桁の支間 1/2 点を打撃した場合における、打撃点の加速度波形とその振幅スペクトルを図-6に示す。G2 桁支間 1/2 点打撃時の打撃点での加速度波形の振幅スペクトルにおいては、6.7 Hz 付近での卓越周波数が見られた。一方、G1, G3 桁支間 1/2 点の加速度波形の振幅スペクトルでは、7.6 Hz 付近にも卓越周波数が見られた。紙面の都合上省略するが、実測振動モード図から、6.7 Hz は対象橋梁の曲げ 1 次振動モード、7.6 Hz はねじれ 1 次振動モードを示す周波数であると考えられる。

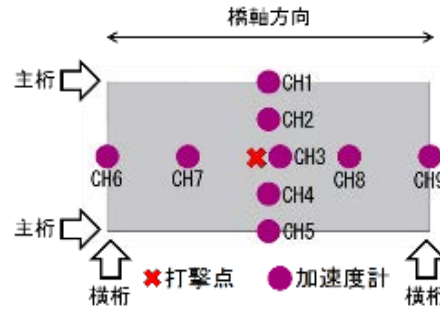
各主桁の支間 1/4 点を打撃した際の、加速度波形および振幅スペクトルを図-7に示す。振幅スペクトルからは、支間 1/2 点打撃時には確認されなかった 15~25 Hz 付近の卓越周波数が確認された。実測振動モード図から、14.6 Hz は曲げ 2 次振動数、20.1 Hz はねじれ 2 次振動数であると考えられる。

表-2 橋梁全体系の振動モードと固有振動数

振動モード	固有振動数 (Hz)
曲げ 1 次	6.7
ねじれ 1 次	7.6
曲げ 2 次	14.6
ねじれ 2 次	20.1



(a) 床版のパネル配置概要



(b) パネル系

図-5 打撃点および加速度計設置位置図

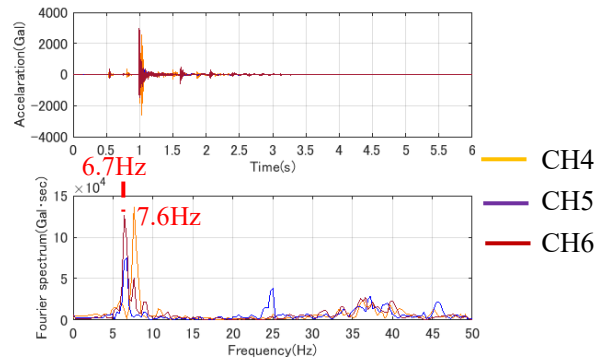


図-6 支間 1/2 点打撃時の加速度波形 (上図) と振幅スペクトル (下図)

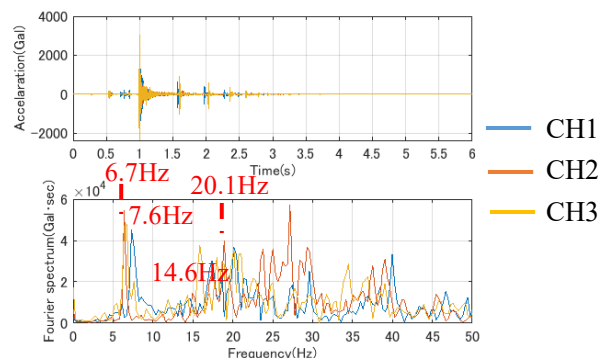


図-7 支間 1/4 点打撃時の加速度波形 (上図) と振幅スペクトル (下図)

以上の結果を整理すると、表-2に示す橋梁全体系の振動モードと固有振動数の関係が得られる。

### 3.2 床版パネル系計測

床版パネル①, ②の(図-3 参照)の中央部を打撃した際の, CH3, CH6, CH9, の加速度波形と得られた振幅スペクトルをそれぞれ図-8, 9 に示す. 打撃直後の最大加速度の大きさは4000~5000 Gal程度であり, 打撃後急激に加速度が減衰していく様子が確認できる. 振幅スペクトルから卓越周波数を求めた. FFT のデータ数は16,384 個, 時間刻みは0.1 ms である.

パネル①の CH9, パネル②の CH6 の加速度波形から得られた振幅スペクトルからは概ね 46.4Hz 付近に卓越周波数が見られた. 一方, どちらのパネルでも, CH3 からは, 46.4 Hz 付近に加えて, 60~70 Hz の範囲に卓越周波数が集中してみられた.

パネル①においてパネル中央(CH3)を打撃した際の, 46.4Hz 付近での実測振動モード図を図-10(a)に示す. 振動モード図の描画にあたっては, 同時測定を実施した各測点における振幅スペクトル $a_n$ と位相差スペクトル $b_n$ を用いて, 式(1)で算定した各測点の値を, 打撃点を1とする比率に基づいて求めた.

$$a_1 \sin(b_1), a_2 \sin(b_2), \dots, a_n \sin(b_n) \quad (1)$$

隣接するパネル②においては横桁を軸とした対象系を成すモード形状を示しており, この振動モード形状は, 隣接するパネルが一体となり挙動して生じる局所曲げ1次振動モードを示すと考えられる. 一方, CH3 での60~70 Hz の範囲での振動モード図は, 図-10(b)に示す様な, パネルが凸形状(または凹形状)を成す傾向が多くみられた. これらは局所曲げ2次振動モードの可能性が考えられる.

支間中央の横桁はRC床版と接触している. 一方, 支間1/4点及び3/4点の横桁は床版に接触していない(図-11). このため, 橋軸方向に隣接するパネル①と②, ③と④, ⑤と⑥, ⑦と⑧がそれぞれ一体として挙動し, 図10(a)のような局所振動モードが生じたものと考えられる.



図-11 床版下面および横桁の概要

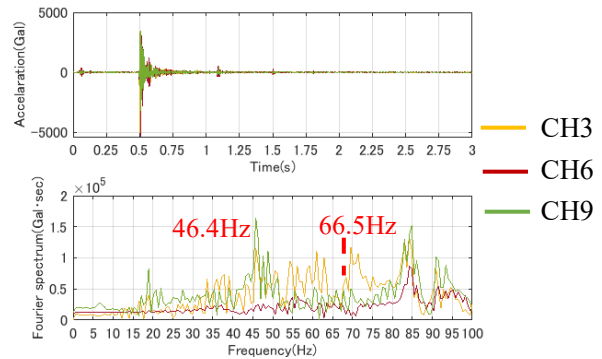


図-8 床版パネル①打撃時の加速度波形(上図)と振幅スペクトル(下図)

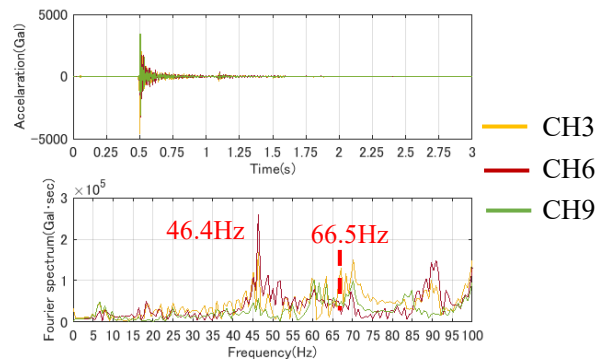
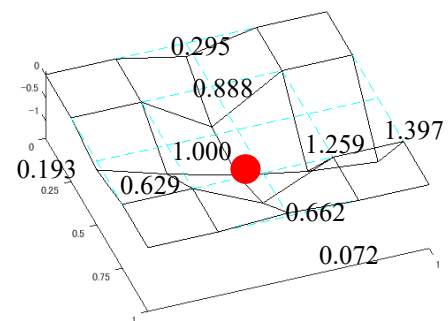
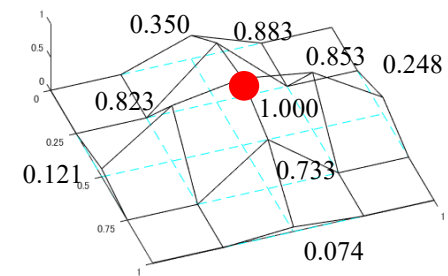


図-9 床版パネル②打撃時の加速度波形(上図)と振幅スペクトル(下図)



(a) 局所曲げ1次振動モード (46.4 Hz)



(b) 局所曲げ2次振動モード (61.0 Hz)

図-10 局所曲げ振動モード図

#### 4. 3次元 FEM 固有値解析による構造特性の検討

##### 4.1 解析モデルの概要

3次元 FEM 解析ソフト ANSYS を用いて、図-12 に示すように対象橋梁上部工の FEM モデルを作成した。本モデルは鋼部材（主桁、横桁）に Shell 要素、コンクリート部材（床版、地覆、舗装）に Solid 要素を使用した。総節点数は 221,580、総要素数は 199,751 である。可動支承の節点に橋軸方向に並進、橋軸直角軸回りに回転のバネモデルを導入した。コンクリート要素と鋼要素で、ヤング係数はそれぞれ 23,500 N/mm<sup>2</sup>、205,000 N/mm<sup>2</sup>、密度はそれぞれ 2,450 kg/m<sup>3</sup>、7,850 kg/m<sup>3</sup> である。コンクリートのヤング係数値は、設計時のコンクリート設計強度 21 N/mm<sup>2</sup> からコンクリート標準示方書より換算して求めた<sup>3)</sup>。

##### 4.2 FEM 固有値解析結果と考察

###### (1) 床版剛性の固有振動数への影響

FEM 解析モデルの固有値解析から、床版剛性値の変化による固有振動数への影響を検討した。図-13 は、ピン-ローラー支承とピン-ピン支承で、床版剛性値を初期状態から 1 割ずつ低下させた場合における曲げやねじれの 1, 2 次振動数、局所曲げの 1, 2 次振動数の変化率を示している。ピン-ローラー支承の場合、床版剛性値の変化に対しては、橋梁全体系の低次振動数に比べて、高次の局所的な振動数がより影響を受けることが分かった。この傾向はピン-ピン支承の場合でも同様に見られた。なお、ねじれ 2 次振動数に関しては他の低次の振動数に比べて変動が大きく、非線形的であった。ピン-ピン支承の場合には、ねじれ 1 次振動数で同様の特徴が見られた。

###### (2) 並進バネの固有振動数への影響

支承の機能不全を考慮するため、支承部に並進バネを導入し、床版の剛性値は初期状態で、支承部に導入した並進バネモデルのバネ定数を変化させ、固有値解析を行った。図-14 に、各々の次数において、ピン-ローラー支承の場合を基準とした固有振動数の相対的な変化率を示す。図-14 より、本モデルにおいて、並進バネ定数の変化に対しては曲げ 1 次振動数が最も大きく影響を受けることが分かった。

###### (3) バネ支承を用いた FEM 固有値解析

床版の剛性値を 1 割ずつ低下させ、その各々の床版剛性値において、FEM 固有値解析により得られる曲げ 1 次振動数が実測曲げ 1 次振動数に近づくように、並進バネ定数を調整した。その後、最小二乗法

により、橋梁全体の振動数が実測値に整合する回転

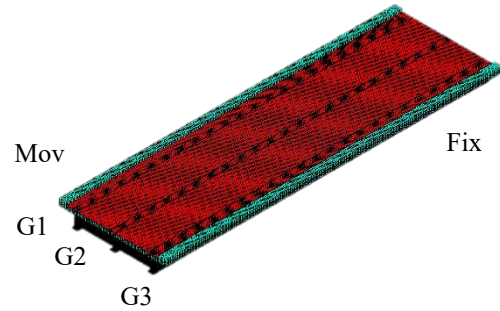
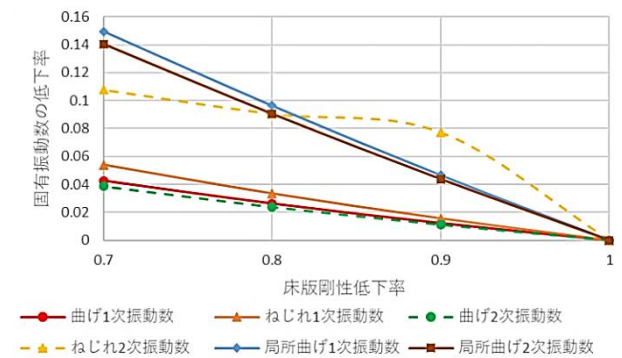
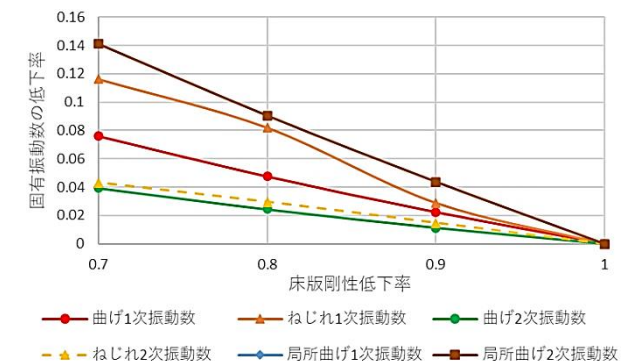


図-12 FEM 解析モデル概要



(a) ピン-ローラー支承



(b) ピン-ピン支承

図-13 床版剛性の低下に対する FEM 解析モデルの固有振動数低下率

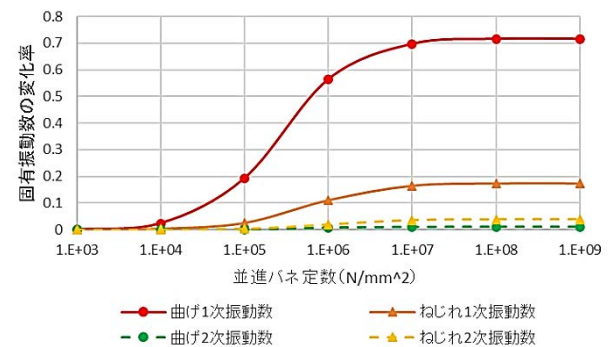


図-14 支承部水平バネ定数に対する固有振動数の変化率

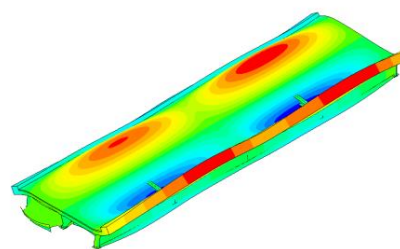
バネ定数を算出した。得られた FEM 固有値解析結果を表-3 に示す。また、FEM 解析モデルの局所曲げ 1, 2 次振動モードの例を図-15 に示す。表-3 から、床版の剛性を 1 割低下させた場合において、実測値との整合性が最も良いことが明らかになった。本モデルでは床版と舗装を一体化して表現しており、対象橋梁の舗装の劣化による影響が、FEM モデルの床版の剛性低下として算出されたものと考えられる。今後、床版剛性と固有振動モードの関係を実測値と重ねてグラフ化する等さらなる検討を考えたい。

## 5. まとめ

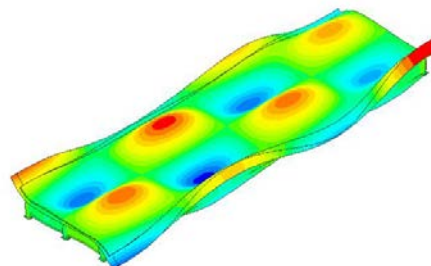
本研究では、対象橋梁の床版上面に小型 FWD 試験機を用いた衝撃振動試験を行い、得られた加速度波形の FFT から、橋梁全体系や床版局所系の振動特性を推定した。橋梁全体系計測からは 2 次までの曲げやねじれの振動数、床版パネル系計測からは高次の局所曲げ振動数が得られた。

また、3 次元 FEM で対象橋梁の上部工モデルを構築し、可動支承部に導入したバネモデルのバネ定数と、床版の剛性値をパラメータとする固有値解析を行った。解析結果から、低次の曲げ振動数は、支承のバネ定数に影響を受け、高次の局所曲げ振動数は床版剛性値に影響を受けることが分かった。これらのパラメータの調整により、固有値解析結果を実測値に整合させることで、対象橋梁の構造特性を推定した。

本手法を充実することで、小型 FWD による橋梁の定量的な健全度評価の実現を目指したい。鋼桁が劣化した場合については、今後の課題としたい。



(a) 局所曲げ 1 次振動モード (45.69 Hz)



(b) 局所曲げ 2 次振動モード (61.62 Hz)

図 15 FEM 解析による局所曲げ振動モード図

### 参考文献

- 1) 大西弘志, 清水則善, 岩崎正二, 出戸秀明, 宮村正樹: 小型 FWD 試験機による鋼桁橋 (九年橋) 衝撃振動試験, 鋼構造年次論文報告集 vol.21, pp.246-251, 2013.
- 2) 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) 土木学会: 2017 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], 丸善出版, 2018.3, p43

(2020 年 7 月 17 日受付)

表-3 FEM 固有値解析結果 (バネ支承の場合) (単位: Hz)

支承条件		ピン-バネ支承			実測値
床版剛性 (N/mm <sup>2</sup> )		2.350×10 <sup>4</sup>	2.115×10 <sup>4</sup>	1.880×10 <sup>4</sup>	
床版剛性低下率		1	0.9	0.8	
並進バネ定数 (N/mm)		10 <sup>6.13</sup>	10 <sup>6.30</sup>	10 <sup>6.63</sup>	
回転バネ定数 (N・m/rad)		10 <sup>8</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>	
固有振動モード	曲げ 1 次	6.71	6.71	6.71	
	ねじれ 1 次	7.59	7.47	6.34	7.6
	曲げ 2 次	15.17	14.96	14.78	14.6
	ねじれ 2 次	18.21	19.51	19.33	20.1
	局所曲げ 1 次	47.91	45.69	43.32	46.4
	局所曲げ 2 次	64.44	61.62	58.62	61.0