

論文

応答加速度を用いた橋梁床版における局部劣化の推定に関する検討

坪井敦也* 大西弘志** 岩崎正二*** 佐々木太一*

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

**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 4-3-5)

***博 (工), 株式会社土木技研 (〒020-0839 岩手県盛岡市津志田南 2-16-20)

本研究では小規模橋梁に対し小型 FWD 試験機を用いた衝撃振動試験を実施し、計測した応答加速度から床版内の対象橋梁損傷状況を推定することを目的とした。複数の隣接計測点間に生じた応答加速度の差について比較検討を行い、床版内の局所的な振動応答の差異の把握を試みた。また、3次元 FEM モデルを作成し、床版の一部を劣化させたモデルで動的解析を行うことで局所的な床版内の損傷検出の可能性について検討を行った

キーワード: 衝撃振動試験, 小型 FWD, 応答加速度, FEM 解析

1. まえがき

現在日本国内の既設道路橋の点検・調査には主に目視点検や車両載荷試験が行われている¹⁾。目視点検は定量的な点検手法とは言い難い。車両載荷試験²⁾は定量的な試験手法ではあるが、この試験方法は費用が膨大になることや交通規制が必要になることから、すべての橋梁に対して実施することは現実的でない。

また、橋梁の定量的な評価方法の一つとして振動試験³⁾が挙げられる。振動試験は床版上に車両走行や重錘落下などによって振動を発生させ、その振動応答を計測・解析することで橋梁の健全度を判定する。従来の振動試験では応答加速度などから求められる固有振動数によって構造物全体の健全度を評価することが多く⁴⁾、局所的な床版劣化の特定は困難であった。

本研究では衝撃振動試験に小型 FWD 試験機を使用し、床版上の複数点で応答加速度の計測を行った。従来方法では応答加速度に FFT(高速フーリエ変換)を行い、橋梁の固有振動数を算出し、床版の剛性変化を捉えることを試みてきた。本研究では従来の検討方法に加え、計測点間の応答加速度

の差分について相関を調べることで床版内の局所的な振動特性の把握を試みた。さらに対象橋梁の 3次元 FEM モデルを作成し、小型 FWD 試験を再現した動的解析を行うことで床版の部分的な劣化が振動応答にどのような影響を与えるか検討を行った。

2. 試験概要

2.1 対象橋梁

本試験の対象橋梁は山形県上市市で 1974 年から供用されている赤山橋である。赤山橋は橋長 16.0m、幅員 8.2m、桁高 700 mm の 3 主桁と RC 床版(床版厚 160 mm)を有し、83°の斜角を持つ鋼合成単純 H 桁橋である。本橋梁は 2015 年に定期点検が行われ、主桁の腐食および防食機能の劣化が確認された。また、床版には下面に鋼板接着が施され、張り出し部には乾燥収縮によるひび割れ、経年劣化によるコンクリートのひび割れや剥離など多数の劣化損傷が認められた。これらの点検結果によって 2019 年に床版取替工事を含む補強工事が行われ、取替後の橋梁床版には RC 構造のプレキャスト床版が採用されている⁵⁾。諸元を表-1 に示

表-1 赤山橋諸元

項目	内容
上部工形式	鋼合成単純 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
支承形式	鋼線支承
橋長	16,000mm
支間長	15,550mm
幅員構成	600+7,000+600=8,200mm
斜角	83°
設計荷重	TL-14

表-2 床版取替前の圧縮強度試験結果と
取替後の設計基準強度 (N/mm²)

	床版取替前			床版取替後
	1	2	3	設計基準強度
圧縮強度	28.2	31.4	15.7	40.0
ヤング率	18.6	18.7	14.6	31.0

す。また、床版取替の際に取替前の床版の圧縮強度試験を実施しており、その試験結果と取替後の床版における設計基準強度を表-2 に示す。

2.2 試験方法

本研究では TML 式小型 FWD システム「FWD-Light」を使用して衝撃振動試験を実施した。この試験機は重錘とその落下機構、載荷盤で構成され、変位計とロードセルを内蔵している。重錘の落下により床版に衝撃を与え、その変位を計測することが可能である。今回の試験では応答加速度データから床版の劣化状況を推定するため、変位の値は使用しない。応答加速度の計測には外部センサーを採用し、衝撃振動による鉛直方向の加速度計測を床版取替工事前後で行った。

小型 FWD 試験機の重錘重さは 25 kg に設定し、落下高さは 1m、加速度計測のサンプリング間隔は 0.1ms とした。図-1 に小型 FWD 試験の実施状況を示す。

(1) 橋梁全体系計測



図-1 小型 FWD 試験実施状況

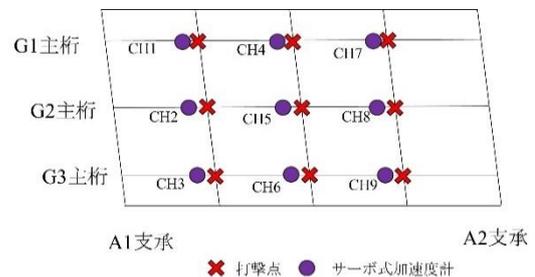


図-2 計測点と打撃点の配置図

応答加速度を計測する計測点と打撃点の配置を図-2 に示す。3 本の主桁(G1~G3)のそれぞれ支間 1/4 点、1/2 点、3/4 点の合計 9 点を重錘の打撃点および応答加速度の計測点とした。1 つの計測点において 3 回以上の打撃を実施し、応答加速度の計測を行った。

(2) 床版パネル系計測

床版の主桁と中間横桁で囲まれた範囲を 1 計測範囲(パネル)とし、4 分割した各パネルに関して試験を行った。

図-3 に床版のパネル分割と加速度計配置を示す。打撃点は各パネル中央部とし、加速度の計測点は橋軸方向及び橋軸直角方向に 4 等分するように十字型に配置した。

なお、加速度計による計測は、床版取替前は 3 台の加速度計で 6 パターン、床版取替後は 5 台で 2 パターンの配置によって実施した。

3. 固有振動数の算定

3.1 FFT 概要

衝撃振動試験で計測した加速度データに対して高速フーリエ変換(FFT)を実行することによって振幅スペクトルと位相差スペクトルが得られ

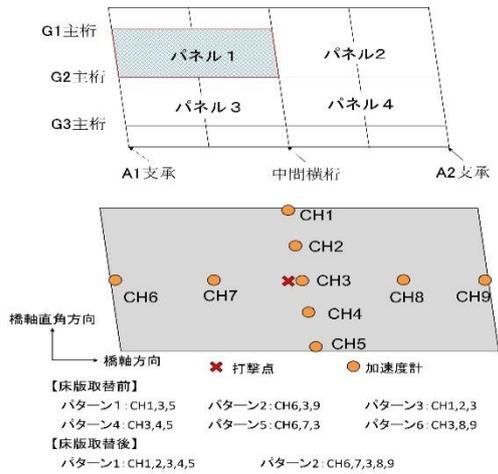


図-3 床版パネル分割と加速度計配置

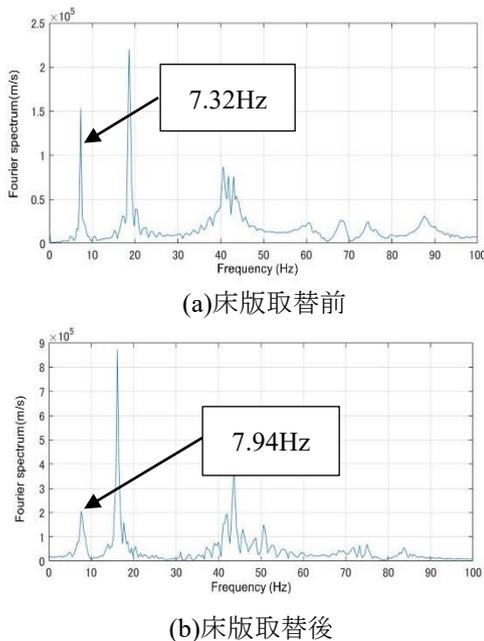


図-4 CH5 打撃時の床版取替前後の振幅スペクトル

加速度データのサンプリング間隔は 0.1ms、データ数は 2^{15} (32768)個で、周波数分解能は約 0.31Hz である。小型 FWD 試験機の特長上重錘落下の際にゴムバッファの反発によって複数回のリバウンドが発生するため、応答加速度には複数回のピークが確認された。そのためリバウンド波形の影響を小さくするため応答加速度データの重ね合わせ処理を行った。複数回のデータを重ね合わせるにより振動波形の振動成分の大小差が大きくなるため、FFT による振幅スペクトルの卓越が明瞭に得られるようになる。

表-3 各振動モードにおける固有振動数

振動モード	固有振動数 (Hz)	
	床版取替前	床版取替後
曲げ 1 次	7.32	7.94
ねじれ 1 次	8.55	8.85
曲げ 2 次	18.9	21.1
ねじれ 2 次	21.1	22.6

3.2 橋梁全体系計測結果

橋梁全体系計測の結果として図-4に G2 桁支間中央を打撃した際の打撃点における振幅スペクトルを示す。G2 桁支間中央打撃時には最低次の卓越振動数として図-4 より床版取替前で 7.32Hz、床版取替後で 7.94Hz が得られた。

各測点の振幅スペクトルと位相差スペクトルを用いて振動モードと固有振動数を特定した。橋梁全体系計測によって得られた各振動モード名と対応する固有振動数を表-3 に示す。

3.3 床版パネル系計測結果と考察

対象橋梁の床版取替前後では床版パネルの支持条件が異なるため、床版パネル系計測による健全度把握は各パネルの卓越振動数の分布性状を比較することによって行う。

図-5 の床版取替前の振幅スペクトルに示す通り、各パネルにおける卓越振動数にはばらつきが生じており、床版取替前の各パネルでは剛性や振動応答特性が異なることが推測される。

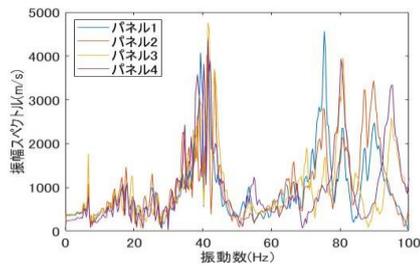
また、パネル 1~3 では 55Hz 付近及び 75Hz 付近にスペクトルのピークが生じているが、パネル 4 のみピークが確認されていないことから、パネル 4 は他のパネルと比較して異なる振動特性を有すると考えられる。

それに対して床版取替後のパネルではすべてのパネルで卓越振動数のピークが一致していることが確認された。そのため、取替後の床版はパネル間に剛性の違いがないような床版であると考えられる。

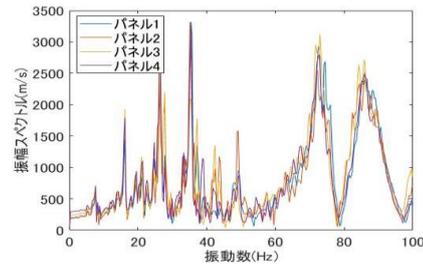
4. 応答加速度差を用いた床版劣化部位の推定

4.1 検討概要

各計測点間に生じる応答加速度の差分により床版内の局所的な振動挙動の確認を試みた。検討



(a) 床版取替前



(b) 床版取替後

図-5 床版取替前後の各パネルの振幅スペクトル

には橋梁全体系計測で得られた加速度データを用いる。先述した衝撃振動試験では複数回のピークが現れ、1 回目のピークから 2 回目のピークまでには約 0.55 秒かかる。そのため本研究は打撃点の加速度データにおいて 1 回目のピークから 0.5 秒間を加速度差の検討範囲とした。

4.2 検討結果と考察

各主桁上の支間 1/4,3/4 点の橋軸方向の計測点間における加速度差の時間変化の曲線をそれぞれ図-6 に示す。以下、図表中の「CH4-CH1」等の表記は「(打撃点)-(加速度差をとる計測点)」とする。

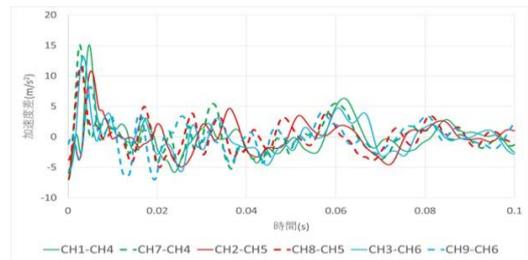
床版取替後では、外桁上の区間と中桁上の区間で異なる加速度差の時間変化がみられる。これは、中桁上を打撃した際には床版が曲げ振動の挙動を示すのに対し、外桁上の点を打撃した際にはねじれ振動の影響を強く受けるためだと考えられる。

床版取替前では、各区間の加速度曲線の一致度が床版取替後と比較して低いことが読み取れる。これは、取替前床版において老朽化によって剛性が一様ではなく、各区間において異なる振動応答を示したためだと考えられる。

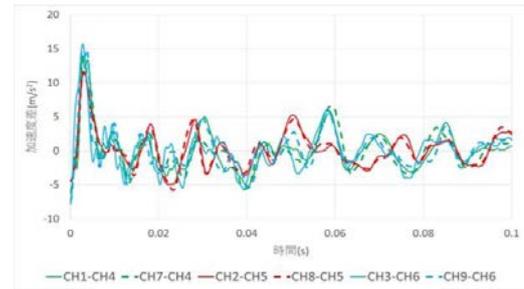
ここで、2 区間の加速度差に対して相関係数を算出することによって定量的な評価を行った。相関係数 r は以下の式によって算出する。

$$r = S_{xy} / S_x S_y$$

ただし、 S_{xy} : 加速度差 x と y の共分散、 S_x : 加速



(a) 床版取替前



(b) 床版取替後

図-6 支間 1/4,3/4 点打撃時の加速度差の時間変化

表-4 赤山橋外桁打撃時の各計測点における相関係数(支間 1/4, 3/4 点打撃時)

床版取替前	CH1-CH4	CH3-CH6	CH7-CH4	CH9-CH6
CH1-CH4		0.64	0.42	0.21
CH3-CH6			0.68	0.17
CH7-CH4				0.27
CH9-CH6				

床版取替後	CH1-CH4	CH3-CH6	CH7-CH4	CH9-CH6
CH1-CH4		0.68	0.84	0.86
CH3-CH6			0.75	0.77
CH7-CH4				0.77
CH9-CH6				

度差 x の標準偏差、 S_y : 加速度差 y の標準偏差であり、加速度差 x と y は 0.5 秒間のデータである。

一般的に相関係数は r の絶対値が 0~0.2 の時ではほぼ相関なし、0.2~0.4 の時で弱い相関、0.4~0.7 の時で中程度の相関、それ以上で強い相関があるとされる。

表-4 に外桁上の支間中央と支間 1/4, 3/4 点の計測点間の加速度差の組み合わせによる相関係数を示す。これらの結果により、床版取替によってすべての組み合わせにおいて相関係数が増加していることが確認された。また、床版取替前におけ

る相関係数では「CH9-CH6」を含む組み合わせにおいて相関係数が小さくなる傾向がみられたため、この区間の近傍において他区間よりも床版が劣化していたのではないかと考えられる。

4.3 床版パネル系計測結果との比較

図-5 で示したように、床版取替前のパネル 4 のスペクトル分布の卓越振動数が他のパネルと異なることがわかる。また、表-4 より計測区間の加速度差の相関係数の算出においてもパネル 4 に含まれる経路を含むと相関係数の値が小さくなる傾向がみられた。このことより、床版取替前の対象橋梁では床版のパネル 4 が他のパネルと比較して異なる振動特性を有するものと考えられる。さらに詳細に相関係数について検討すると、CH9 を範囲に含むと相関係数が低くなる傾向がみられたため、取替前床版においては CH9 付近で床版剛性が他の部分と異なる部分があった可能性が考えられる。

5. FEM 動的解析

5.1 FEM 動的解析概要

本研究では対象橋梁の動的特性の把握のため、汎用 3 次元 FEM 解析ソフト ANSYS を用いて対象橋梁の可動支承にバネ要素を導入した床版取替後の上部工モデルを作成し、動的解析を実施した。

図-7 に作成した 3 次元 FEM 解析モデルを示す。床版及び主桁、横桁、垂直補剛材を Shell 要素でモデル化しており、総節点数は 16186、総要素数は 17416 である。本研究モデルでは舗装と地覆は考慮していない。なお、取替後の床版ではコア抜き試験を行っておらず、鋼材の材料試験なども行っていないため、道路橋示方書の値を採用した⁸⁾。

時刻歴応答加速度解析においては、応答加速度差の検討計測結果より、床版のパネル 4 の CH9 付近において床版剛性が異なるという結果が得られたので床版のモデル化に考慮する。そこで図-7 に示すように実試験におけるパネル 4 のうち、加速度計を配置した範囲を 9 分割し、そのうち区間 CH9-CH5 に含まれる①と区間 CH9-CH6 に含まれる②のヤング係数を下げて解析を行うことによって、その部分に劣化が生じていると仮定したときの小型 FWD 試験を再現した

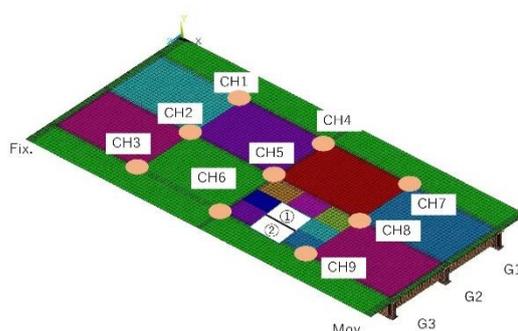


図-7 対象橋梁上部工の 3 次元 FEM モデル

5.2 FEM 時刻歴応答解析結果と考察

解析応答加速度差を用いた各計測区間の組み合わせの相関係数の結果は表-5 に示すとおりである。表 5 では健全モデル（ヤング係数 100%で 3163N/mm²）及び部分劣化モデル（ヤング係数 70%で 2214N/mm²）における加速度差の相関係数を比較している。ヤング係数の低下率に関しては先行研究より、FEM モデル床版の一部のヤング係数を 70%より低下させると相関係数がすべての組み合わせにおいて弱まることから 100%と 70%において比較した。表-5 の(a)の 2 表は、外桁支間 1/4, 3/4 点打撃時の主桁に沿わない区間の組み合わせの相関係数を示しているがヤング係数が 100%,70%の時ともに CH5 を点対象とする区間において比較的高い相関がみられた。この理由として、対象橋梁が 83° の斜角を持つ斜橋であり橋梁形状が床版中央を中心に点対称であるため、対角となる区間の振動特性が類似していることが考えられる。その他区間では斜角の影響の影響を強く受けたため相関係数が低くなったと考えられる。また、①部分のヤング係数を 100%から 70%に下げたにもかかわらず、相関係数の値に変化がみられなかった。その理由としては、床版のヤング係数を下げる範囲が小さ過ぎて応答加速度に大きな変化を与えなかったためと考えられる。

また、表-5 の(b)の 2 表は、外桁支間 1/4, 3/4 点打撃時の主桁に沿った区間の組み合わせの相関係数を示している。先述した主桁に沿わない区間の組み合わせと同様に CH5 を点対象とする区間（CH1-CH4 と CH9-CH6, CH3-CH6 と CH7-CH4）において比較的高い相関が認められた。健全モデルと部分劣化モデルの加速度差の相関係数を比較しても変化が見られなかった。また、CH9-CH6 の区間に含まれる②部分のヤング係

表-5 時刻歴応答加速度解析結果

(a) 支間 1/4,3/4 点打撃斜め方向
①部分ヤング率変化

ヤング係数 100%	CH9- CH5	CH1- CH5	CH3- CH5	CH7- CH5
CH9-CH5		0.81	0.58	0.62
CH1-CH5			0.56	0.53
CH3-CH5				0.81
CH7-CH5				

ヤング係数 70%	CH9- CH5	CH1- CH5	CH3- CH5	CH7- CH5
CH9-CH5		0.81	0.58	0.65
CH1-CH5			0.54	0.53
CH3-CH5				0.79
CH7-CH5				

(b) 支間 1/4,3/4 点打撃橋軸方向
②部分ヤング率変化

ヤング係数 100%	CH9- CH6	CH3- CH6	CH1- CH4	CH7- CH4
CH9-CH6		0.55	0.89	0.61
CH3-CH6			0.52	0.83
CH1-CH4				0.59
CH7-CH4				

ヤング係数 70%	CH9- CH6	CH3- CH6	CH1- CH4	CH7- CH4
CH9-CH6		0.54	0.88	0.61
CH3-CH6			0.52	0.82
CH1-CH4				0.60
CH7-CH4				

数を 70%に低下させた場合でも相関係数が著しく低下することはなかった.これは主桁に沿わない区間の検討と同様にヤング係数を下げた範囲が小さかったためと考えられる.

今後の課題としては,床版のヤング係数を低下させる範囲の再検討を行うことである.解析に使用するモデルでは舗装や地覆を考慮していないためそれらの影響についても考慮することが必要になると考えられる.

6. まとめ

今回の研究では小型 FWD 試験機で得た応答加速度に対して打撃点と計測点の差分を検討し,2

区間の組み合わせにおける相関係数を算出することによって局所的な床版劣化の特定と,定量的な評価方法の確立を目指した.それらの結果として局所的な床版劣化の特定には至らなかったが今後は対象橋梁の 3 次元 FEM 解析モデルについて詳細に検討し,解析の精度を高めていくことが必要とされる.今回は床版の劣化について相関係数を用いて局所的な床版劣化について検討を行ったが今後は相関係数に代わる劣化指標についての検討を行っていく予定である.

参考文献

- 1) 国土交通省 道路局 国道・技術課：橋梁定期点検要領
www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/tenken/yobo3_1_6.pdf, 2019.3
- 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, Vol61A, pp.1062-1072, 2015.3
- 3) 三東豪士, 大西弘志, 岩崎正二, 出戸秀明, 清水則善, 宮村正樹：小型 FWD 試験機を用いた実橋 RC 床版の振動特性調査, 土木学会第 69 回年次学術講演会, I-112, 2014.9
- 4) 渡邊学歩, 友廣郁也, 後藤悟史, 江本久雄：橋梁振動実験に基づく斜橋の固有振動数の同定と部材の損傷が振動特性に及ぼす影響に関する基礎的研究, 構造工学論文集 Vol.60A, 2014.3
- 5) 宮村正樹, 岩崎正二, 出戸秀明, 加藤哲, 早坂洋平：衝撃振動試験および動たわみ測定による実橋 RC 床版の健全度評価, 構造工学論文集, Vol.58A, pp.1134-1143, 2012.3
- 6) 羽矢洋：衝撃振動試験法による鉄道橋梁下部構造の健全度診断, 特集/都市機能を支えるコンクリート技術, Vol.46, No.1, 2008.1
- 7) 高橋明彦, 阿部忠, 小野晃良, 大西弘志, 久保真：打ち継ぎ目を有する RC プレキャスト床版の耐疲労性の検証に関する実験研究, 第 10 回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp.29-34, 2018.11
- 8) 公益社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IIIコンクリート橋・コンクリート部材編, 2017.11

(2022 年 7 月 8 日受付)

(2022 年 9 月 9 日受理)