

論文

床版取替が小規模橋梁の振動特性に与える影響に関する一考察

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

*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), 株式会社昭和土木設計 (〒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)

****岩手大学, 大学院博士課程工学研究科機械・社会環境システム工学専攻
(〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5)

*****株式会社昭和土木設計 (〒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)

近年, 橋梁の老朽化が深刻な問題となっており, 簡易かつ定量的に健全度評価をする手法として RC 床版等に対する重錘落下試験の活用に関する研究が進められている. 本研究では, 山形県で供用されている小規模橋梁に対して, 床版取替前後で種々の衝撃振動試験等を実施し, 床版取替が対象橋梁の床版や全体の振動特性に与える影響について検討した.

キーワード: 床版取替, 衝撃振動試験, 健全度評価, 小型 FWD 試験

1. まえがき

現在, 我が国には約 72 万橋もの道路橋があるとされており, そのうちの 7 割以上が市町村道に存在する¹⁾. また, 我が国における道路橋の整備の特徴は, 高度経済成長期に建設数が急増していることである. このため, 現在は建設後 50 年を経過する老朽化橋梁が急激に増加する時期に差し掛かっており, 橋梁の定期点検とそれに基づく修繕計画の策定が重要となっている. また, 今後の効率的な維持管理を実現するためには橋梁の補修・補強の効果についても定期点検と同様, データを蓄積することが重要と考えられる.

現在, 既設橋梁の定期点検の手法としては目視点検による外観調査や打音検査等の非破壊検査が行われている. また, 床版取替等を含む大規模改修による補強効果の確認に車両載荷試験が行われている. しかし, 目視点検や打音検査では点検結果が点検技術者の技量に左右され, 車両載荷試験では大規模な交通規制を伴い, 多大な労力, 費用や時間が必要となる. この状況を改善するために, より定量的かつ簡易的な橋梁の点検・調査手法が必要であると考えた.

そこで本研究では橋梁全体及び床版に対する簡易的な点検手法として小型 FWD 試験機を用いた衝撃振動試験に着目した. 近年では橋梁に対する衝撃振動試験として様々な研究が行われている^{2,3)}. 小型 FWD 試験機は小型であるため可搬性に優れ, 短時間で多数の点での計測が可能な装置である.

本研究では対象とした小規模橋梁における床版取替前後で小型 FWD 試験機を用いた重錘落下試験を行い, そ

の結果に基づき橋梁全体の振動性状の変化を比較・調査した. また, 本試験を行った際に同時に実施した 14t トラックによる車両走行試験や踏み台落下試験の結果との比較から, 小型 FWD 試験機を用いた本手法が橋梁の補修・補強の効果の確認に適用可能か検討した.

2. 対象橋梁の概要

本研究で対象とした橋梁は山形県上山市赤山地内で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 700mm, RC 床版 (床版厚 160mm) を有する鋼合成単純 H 形桁橋である. 対象橋梁は 1974 年の供用開始から 40 年以上が経過しており, 2015 年に定期点検が行われている. その際に主桁や横桁には経年劣化による腐食, 防食機能の劣化などが見られた. また, 床版には鋼板接着による補強がされているが, その鋼板にも経年劣化による腐食や防食機能の劣化がみられ, 張り出し部には乾燥収縮によるひび割れや経年劣化によるうきや剥離がみられた. そこで, 対象橋梁は 2019 年春に床版取替などの補強工事が行われた. 取替後の床版には RC 構造のプレキャスト床版が採用されている⁴⁾. 床版取替前はコンクリート舗装厚 50mm, アスファルト舗装厚 30mm であり, 床版取替後はアスファルト舗装厚 50mm である. また, 対象橋梁は斜角 83° を有する斜橋である. 対象橋梁の床版取替後の上部工断面図及び平面図をそれぞれ図-1, 図-2 に示す. さらに, 対象橋梁の床版取替前の橋梁上面の状況を写真-1 に, 対象橋梁の諸元を表-1 に示す.

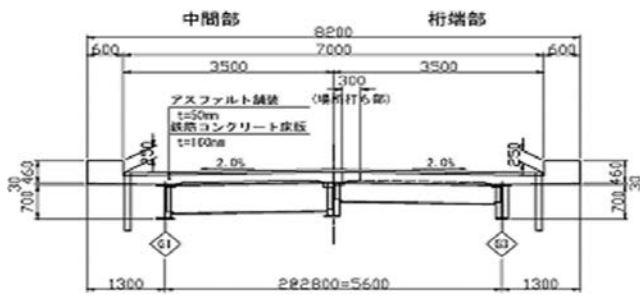


図-1 床版取替後の対象橋梁上部工断面図

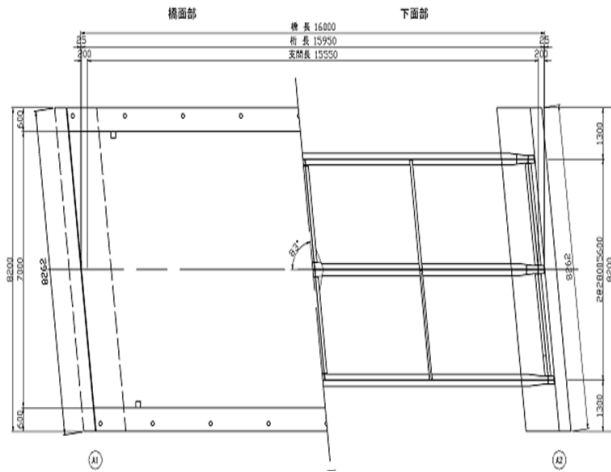


図-2 床版取替後の対象橋梁平面図

3. 小型 FWD 試験

3.1 小型 FWD 試験概要

本試験で用いた試験機は TML 式小型 FWD システム「FWD-Light」である²⁾。本試験機は、本体の重錘を橋梁床版上に自由落下させることにより衝撃荷重を発生させ、その際の衝撃荷重と載荷点直下のたわみ量を計測するものである。本試験機では、既定の位置から重錘を落下させるための固定可能な落下機構部を設けることにより、安定した落下高さを確保でき、安定した衝撃力を発生させることができる。なお、今回の計測では、小型 FWD 試験機による衝撃振動を外部センサとしてサーボ式加速度計を使用して鉛直方向の加速度の計測を行った。使用した加速度計及び小型 FWD 試験機の概要を写真-2 に、実際に本研究で用いた小型 FWD 試験の設置例を写真-3 にそれぞれ示す。

3.2 試験手法

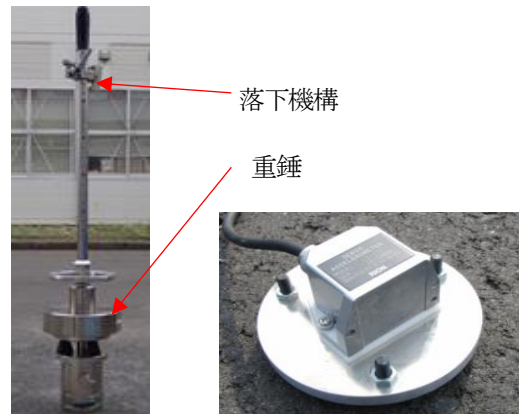
本試験では、対象橋梁の RC 床版上に小型 FWD 試験機により、高さ 1m の位置から重さ 25kg の重錘を落下させる衝撃振動試験を行った。打撃点として 3 主桁のそれぞれ支間 1/4 点、1/2 点、3/4 点を打撃し、打撃点と同様の位置に加速度計を配置し、合計 9 箇所で行撃・計測を行った。床版取替後は計測機器の不具合が確認されたため、打撃点及び計測点は変えずに加速度計を 6 個用いて計測を行った。一つの打撃点に対して支間 1/2 点を境に加速度計を 2 パターンで配置して計測を行った。床版取



写真-1 床版取替前の橋梁上面の状況

表-1 対象橋梁諸元

上部工形式	鋼合成単純 H 形桁橋
下部工形式	逆 T 式橋台
基礎工形式	直接基礎
主桁本数	3 本
床版形式	RC 床版
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	14t



(a) 小型 FWD 試験機本体 (b) サーボ式加速度計
写真-2 小型 FWD 試験機



写真-3 小型 FWD 試験設置例

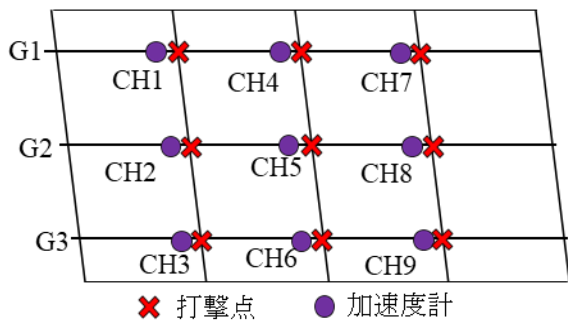


図-3 床版取替前の打撃点，加速度計配置図

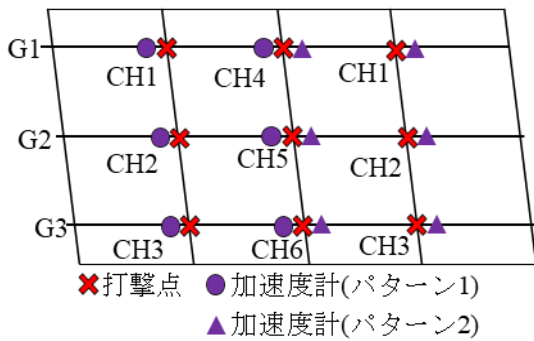


図-4 床版取替後の打撃点，加速度計配置図

替前後の加速度計の配置図をそれぞれ図-3, 4 に示す。

3.3 試験結果と考察

本研究では，得られた加速度データに対して，高速フーリエ変換 (FFT) 方式で各点の振幅スペクトル及び位相差スペクトルを算出したのち，固有振動数を求めた。FFT の周波数分解能は式 (1) により定めた。

$$\Delta\omega = 1/(\Delta t \times n) \quad (1)$$

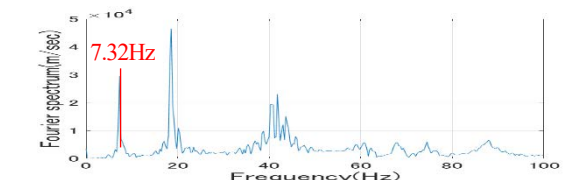
ここで， $\Delta\omega$ ：周波数分解能 (Hz)， Δt ：サンプリング間隔， n ：データ数

本研究ではサンプリング間隔 0.1 ミリ秒，データ数 32768 個で FFT を行った。この場合の分解能は約 0.305Hz となる。本試験において，各主桁支間 1/4 点及び 1/2 点打撃のスペクトル図には明瞭な差を確認しているため，各主桁の 1/2 点及び 1/4 点打撃に分けて結果の考察を行う。

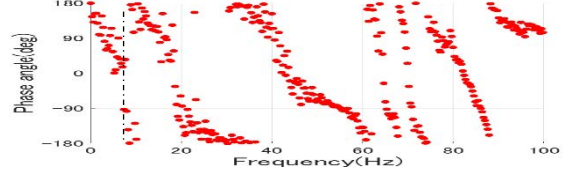
(1) 支間 1/2 点打撃時

図-5, 6 にそれぞれ床版取替前後の G2 桁支間 1/2 点を打撃した際の打撃点における振幅スペクトル及び位相差スペクトルを示す。振幅スペクトルは複数の卓越が確認されたため，振幅スペクトルが卓越し，位相差スペクトルが 270° (-90°) を示す振動数を卓越振動数として算出した⁹⁾。その結果，床版取替前は 7.32Hz，取替後は 7.94Hz が最低次の固有振動数として算出された。次に，図-7, 8 にそれぞれ床版取替前後の G1 桁支間 1/2 点を打撃した際の打撃点における振幅スペクトル及び位相差スペクトルを示す。G1 桁支間 1/2 点打撃時のスペクトルには，G2 桁支間 1/2 点打撃時の卓越振動数に加えて床版取替前は 8.55Hz，取替後は 8.85Hz が卓越振動数として算出された。

(2) 支間 1/4 点打撃時

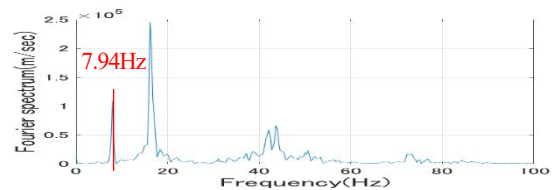


(a) 振幅スペクトル

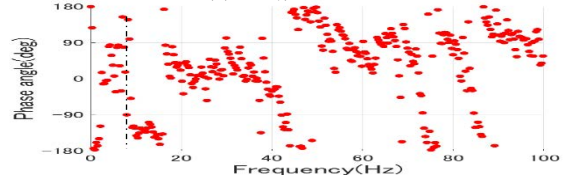


(b) 位相差スペクトル

図-5 床版取替前 G2 桁支間 1/2 打撃時

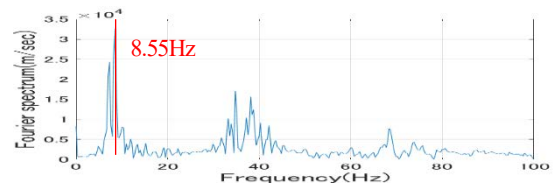


(a) 振幅スペクトル

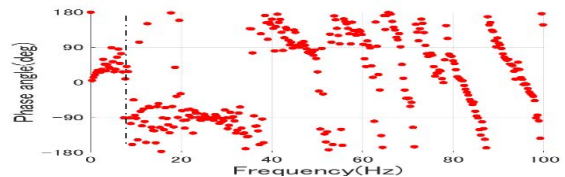


(b) 位相差スペクトル

図-6 床版取替後 G2 桁支間 1/2 打撃時



(a) 振幅スペクトル

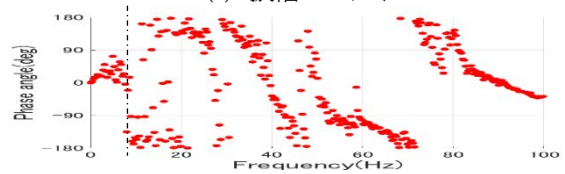


(b) 位相差スペクトル

図-7 床版取替前 G1 桁支間 1/2 打撃時



(a) 振幅スペクトル



(b) 位相差スペクトル

図-8 床版取替後 G1 桁支間 1/2 打撃時

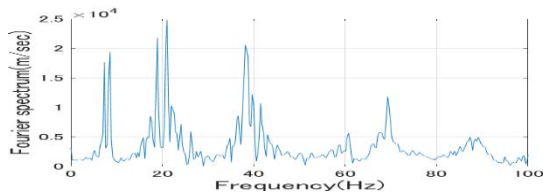
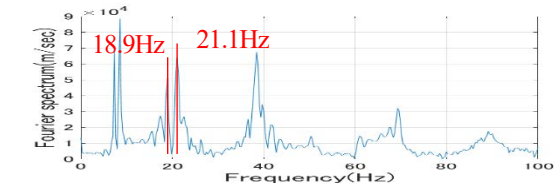
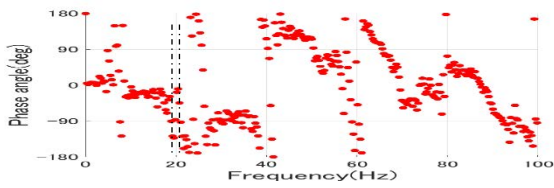


図-9 床版取替前 G1 桁支間 1/4 打撃の
振幅スペクトル



(a) 振幅スペクトル



(b) 位相差スペクトル

図-10 重ね合わせ処理を行った際の床版取替前
G1 桁支間 1/4 打撃

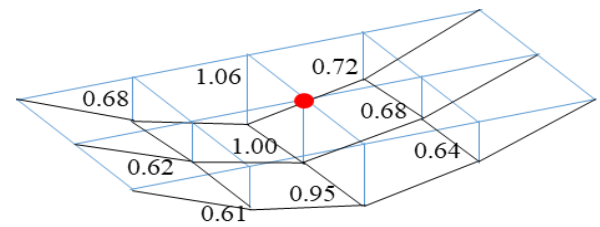
図-9に床版取替前のG1桁支間1/4点を打撃した際の打撃点における振幅スペクトル図を示す。各主桁支間1/4点を打撃した際には17Hzから26Hz付近の間に複数の振幅の卓越が認められた。これは、重錘が複数回バウンドすること等のノイズによるものと考えられる。そこで、ノイズによるS/N比を改善するために同一地点を複数回打撃した際の加速度波形の重ね合わせ処理を行った。重ね合わせ処理を行った際のG1桁支間1/4点の振幅及び位相差スペクトル図を図-10に示す。重ね合わせ処理を行うことにより、振幅のばらつきが収束し、卓越振幅が明瞭に確認された。その結果、G1桁1/4点を打撃した際は床版取替前で18.9Hz、21.1Hz、床版取替後は22.6Hzを卓越振動数として決定した。また、スペクトル図は省略するがG2桁1/4点を打撃した際は床版取替前で18.6Hz、床版取替後で21.1Hzが卓越振動数として確認された。

3.4 実測振動モード

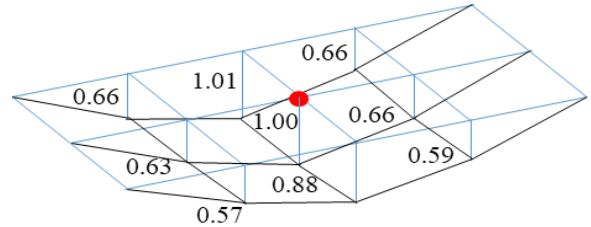
各打撃点から得られた卓越振動数において、振幅スペクトル及び位相差スペクトルから実測振動モードの描画を行った。加振位置における位相差スペクトルの270°付近を示し、かつ振幅が卓越している振動数を読み取った後、他の計測点での振幅 a_n と位相差 b_n を読み取り、式(2)より求めた値を加振位置を1.00とした比率で描いた。

$$a_1 \sin b_1 : a_2 \sin b_2 : \dots : a_n \sin b_n \quad (n: \text{CH 番号}) \quad (2)$$

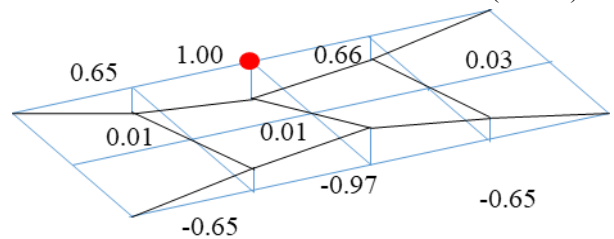
図-11にG1桁とG2桁の支間1/2点及び1/4点の各打撃点による実測振動モード図を示す。図中の丸は打撃点を示している。これらの結果より、支間1/2点を打撃し



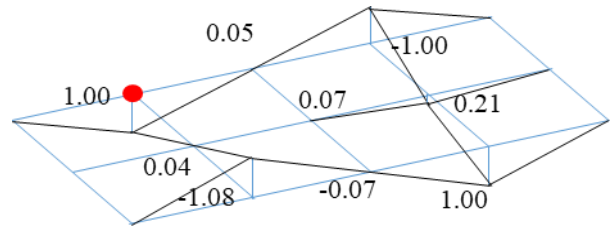
(a) 床版取替前曲げ1次振動モード(7.32Hz)



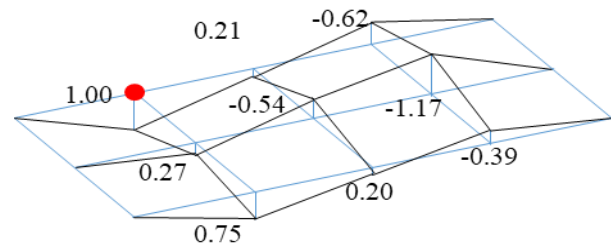
(b) 床版取替後曲げ1次振動モード(7.94Hz)



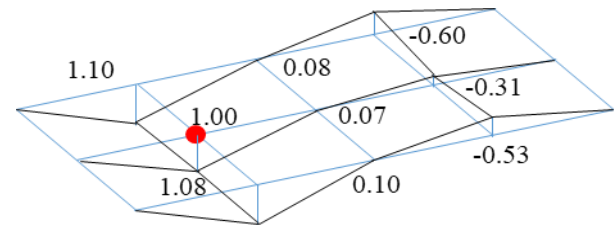
(c) 床版取替前ねじれ1次振動モード(8.55Hz)



(d) 床版取替前ねじれ2次振動モード(21.1Hz)



(e) 床版取替前曲げ2次振動モード(18.9Hz)



(f) 床版取替後曲げ2次振動モード(21.1Hz)

● : 打撃点

図-11 各打撃点における振動モード図

た際には1次振動モード、支間1/4点を打撃した際には2次振動モードが励起されることが分かった。しかし、床版取替前のG2桁支間1/4点を打撃した際には曲げ2

表-2 実測振動モードと固有振動数

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

次振動モードは確認されなかった。これらの結果から、固有振動数と振動モードの関係を表-2に示す。表-2より、床版取替後の固有振動数は取替前と比べて曲げ1次で約8%、ねじれ1次で約4%の増加が認められた。また、曲げ2次で約12%、ねじれ2次で約7%の増加が認められた。床版取替により、質量は多少増加したものと考えられる。また、床版取替後はたわみ量が減少していることが確認されているため、床版取替により橋梁全体の剛性が増加したことが固有振動数増加の理由と考えられる。

4. 動的載荷試験

4.1 車両走行試験と踏み台落下試験

本研究では、小型 FWD 試験の他に対象橋梁に対して床版取替前後で 14t トラックを用いた車両走行試験及び踏み台落下試験を行った。本論文では、小型 FWD 試験の振動特性との比較を行うため、両試験の加速度計測による結果について検討を行う。両試験共に加速度計は G1 桁、G2 桁、G3 桁のそれぞれ支間 1/4、1/2、3/4 点の下フランジに計 9 点設置した。

(1) 車両走行試験

車両走行試験は、14t トラックを幅員中央、G1 桁、G3 桁上に片側の車輪が乗るように走行させ、走行速度をそれぞれ 10km/h、20km/h とする 6 パターンで計測を行った。

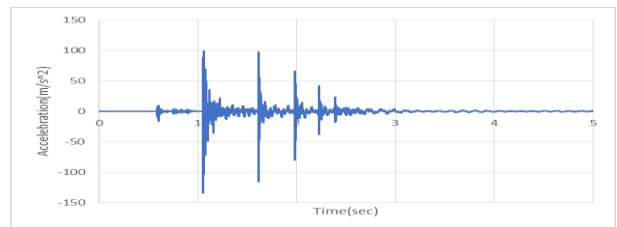
(2) 踏み台落下試験

踏み台落下試験は 14t トラックの後輪を木片に乗り上げさせた後、後輪を落下させた際の対象橋梁の応答加速度を計測した。落下箇所は、床版取替前は各主桁支間 1/2 点及び G2 桁支間 1/4 点、床版取替後は取替前の落下箇所に加えて G1 桁支間 1/4 点とした。

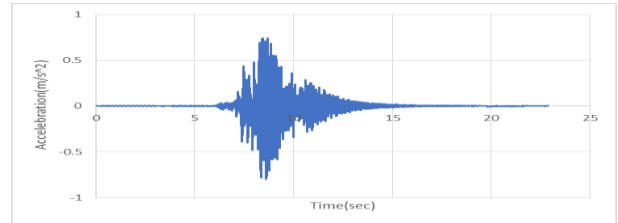
4.2 試験結果と考察

小型 FWD 試験と同様に、両試験においても FFT 方式にて固有振動数の算出を行った。

図-12 に小型 FWD 試験と車両走行試験の加速度波形の一例を示す。車両走行試験及び踏み台落下試験に比べて小型 FWD 試験は加速度の波形が大きかった。これは、車両走行試験と踏み台落下試験では、14t トラックが床版上を走行するため、主桁に加速度計を配置したのに対し、小型 FWD 試験では橋面上に配置したことが考えられる。図-13、14 にそれぞれ床版取替後の G2 桁上 20km/h で



(a) 小型 FWD 試験による加速度波形

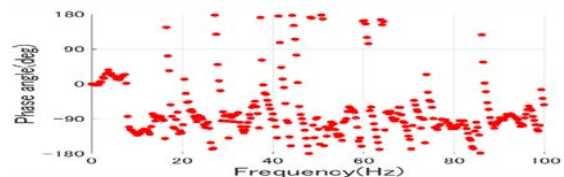


(b) 車両走行試験による加速度波形

図-12 各試験の加速度波形

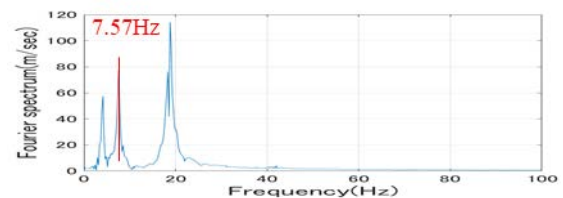


(a) 振幅スペクトル

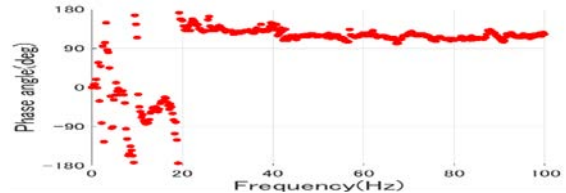


(b) 位相差スペクトル

図-13 床版取替後 G2 桁 20km/h 走行



(a) 振幅スペクトル



(b) 位相差スペクトル

図-14 床版取替前 G2 桁支間 1/2 点落下

走行した際の振幅及び位相差スペクトル図及び床版取替前の G2 桁支間 1/2 点にトラック後輪を踏み台落下させた際の振幅及び位相差スペクトル図の一例を示す。

小型 FWD 試験と同様に、両試験から得られた振幅スペクトル及び位相差スペクトルから振動モード図の描画を行った。表-3、4 に車両走行試験及び踏み台落下試験から得られた固有振動数と振動モードの関係を示す。そ

表-3 車両走行試験による固有振動数

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	7.33	7.94
ねじれ1次	8.55	8.85
曲げ2次	—	20.8
ねじれ2次	—	22.3

の結果、小型 FWD 試験と車両走行試験では、固有振動数の値がほぼ一致していることが認められた。踏み台落下試験の固有振動数は、小型 FWD 試験や車両走行試験に比べて若干のずれが生じた。これは、踏み台落下試験はトラック後輪が木片から落下した後も水平に移動することにより波形が複雑になったためと考えられる。床版取替前は車両走行試験及び踏み台落下試験では2次振動モードは確認されなかった。これは、小型 FWD 試験による加速度計測に比べて両試験の加速度の値が小さかったことにより振幅が卓越しなかったためと考えられる。また、床版取替前の対象橋梁は、取替後に比べて支間中央横桁と床版が接着しているなど構造上の違いも関係している可能性も考えられる。

5. まとめ

本研究では、小規模橋梁の床版に対する振動試験について、小型 FWD 試験と車両走行試験及び踏み台落下試験を実施し、床版取替が小規模橋梁の全体振動特性に与える影響について比較検討した。本論文で得られた知見を以下に示す。

- (1) 小型 FWD 試験による加速度計を用いた多点同時計測から、小規模橋梁の2次までの振動モード及び固有振動数の特定が可能である。
- (2) 小型 FWD 試験の得られた加速度波形に対して、同一地点を打撃した際の複数のデータを重ね合わせるにより、小型 FWD 試験の課題であった振幅スペクトルのノイズが除去され、卓越振幅が明瞭に確認された。
- (3) 小型 FWD 試験とその他の動的試験から床版取替前後で固有振動数の値がほぼ一致した。このことから、簡易かつ定量的な小規模橋梁の全体振動特性評価として本試験手法が適用可能であると考えられる。
- (4) 床版取替により、1次、2次の曲げ振動モードに関

表-4 踏み台落下試験による固有振動数

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	7.57	8.24
ねじれ1次	8.79	9.16
曲げ2次	—	21.1
ねじれ2次	—	22.3

する固有振動数は取替前と比べてそれぞれ 8%と 12%増加することが分かった。床版取替による低次の固有振動数の変化は大きくないが、本手法で捉えることが可能である。このため本手法は、床版取替などの補修・補強効果の確認に利用できる。

今後は、本橋梁に対して3次元 FEM 固有値解析を実施し、小型 FWD 試験結果と比較検討する予定である。

謝辞

本研究において、株式会社小野工業所の高橋明彦氏には、実験の準備や周辺住民への周知など様々な配慮を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省：老朽化対策の取り組み、<https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/torikumi.pdf>
- 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, 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 床版の振動特性評価, 土木学会第 69 回年次学術講演会, I-112, 2014.9
- 4) 高橋明彦, 阿部忠, 小野晃良, 大西弘志, 久田真: 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, pp29-34, 2018.11
- 5) 土木学会舗装工学委員会: FWD 及び小型 FWD 運用の手引き, 2002.12
- 6) 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, 特集/都市機能を支えるコンクリート技術, Vol46, No1, 2008.1

(2020年7月17日受付)