

論文

衝撃振動試験による RC 床版の健全度評価手法の可能性に関する検討

千田昌磨*, 大内皓平*, 千葉陽子**, 高橋明彦***, 岩崎正二****, 大西弘志*****

*岩手大学, 工学研究科社会環境工学専攻 (〒080-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5)

**一般財団法人橋梁調査会, 東北支部 (〒980-0014 宮城県仙台市青葉区本町 2-1-29)

***陸奥テックコンサルタント株式会社, 取締役統括本部長 (〒963-2077 福島県郡山市若葉町 17-18)

****工博, 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 4-1-23)

*****博 (工学), 岩手大学准教授, 工学部社会環境工学科 (〒080-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5)

従来 FWD 試験は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、現在では道路橋床版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。本研究ではより簡易的に使用できる小型
 FWD 試験機を用いた衝撃振動試験を行った。対象とした橋梁は岩手県
 内陸部の自治体が管理する、橋長 20.0m、鋼単純合成 H 桁橋である。本
 論では試験によって計測された応答加速度波形の分析を行い、床版の健
 全度評価が可能か検討を行った。

キーワード: RC 床版, 健全度評価, FWD 試験, 維持管理

1 はじめに

日本における橋梁は高度経済成長期にその多くが建設
 されており、今後建設から 50 年を超える橋梁数が急激に
 増加することになる。そのためこれらの橋梁が架け替え
 や大規模な補修補強を必要とする時期を一斉に迎えるこ
 とになると予測され、将来における構造物の適切な維持
 管理が重要となる。

道路橋の損傷において、その多くが床版の劣化・損傷
 によるものとされており、道路橋の維持管理では床版の
 健全度を評価することが重要であると認識されている¹⁾。
 床版は自動車荷重を直接支持するため疲労が生じやすく、
 舗装面割れ、床版下面のひび割れ、コンクリートの骨材
 化、陥没などの現象が損傷として現れる。しかし床版の
 損傷は重篤化するまで目視による損傷の特定は困難であ
 る。

一方、橋梁床版に対して従来的に行われている健全度
 評価手法には目視点検や打音検査、車両載荷試験などが
 ある。しかしこれらの手法は労力やコストがかかる上、
 定量的に損傷を特定し、健全度を評価するには技術的
 な課題がある。そのため、損傷が重篤化する前に、定量的
 に損傷を特定出来る新たな床版の健全度評価手法の開
 発が必要であると考える。

以上のような背景を踏まえ本研究では RC 床版を対象
 とした衝撃振動試験として FWD (Falling Weight
 Deflectometer) 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²⁾。本研究では実橋 RC 床版にお
 いてより簡易的に使用できる小型 FWD 試験機を用いた
 衝撃振動試験を行った。小型 FWD 試験機は小型で可搬
 性に優れており、短時間で多数点での測定が可能である
 ことから、従来方法と比べてより簡易的に利用すること
 ができる。小型 FWD 試験機を用いた衝撃振動試験にお
 いては、床版各所の変位を計測するとともに、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。計測された変位と加速度のデータの関係性か
 ら床版の状態の評価が可能か検討を行った。

2 試験概要

2.1 対象橋梁

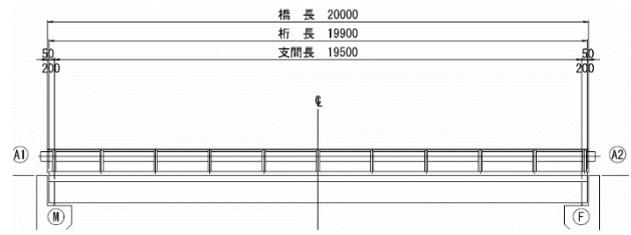
本研究で対象とした橋梁は岩手県胆沢群金ケ崎町の跨
 川道路橋、下渋川橋 (写真-1) である。表-1 に下渋川
 橋の橋梁諸元、図-2 に一般図を示す。下渋川橋は 1974
 年に供用を開始している。橋梁形式は上部工が鋼単純合
 成 H 桁橋、下部工が逆 T 式橋台である。橋長は 20.0m、全
 幅は 6.3m である。床版は RC 床版であり、床版厚さは
 160mm、舗装はコンクリート舗装である。本橋梁は 2011
 年に橋梁点検が行われており、主桁や横桁に大きな損傷
 は見受けられなかった、しかし床版及び舗装については、
 鉄筋露出、抜け落ちは無かったものの、床版下部のひび
 割れ、遊離石灰、舗装面の劣化が激しいという結果であ
 った。



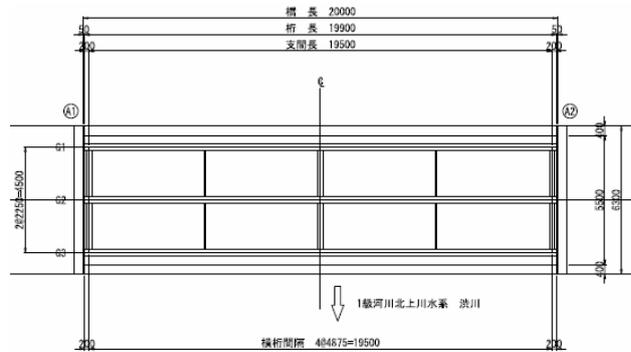
写真-1 下渋川橋

表-1 下渋川橋 橋梁諸元

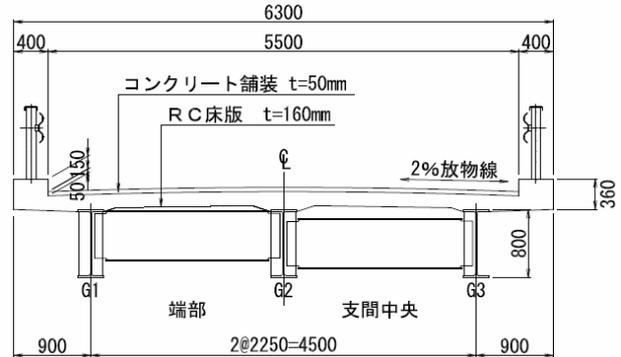
項目	内容
上部工形式	鋼単純合成H桁橋
下部工形式	逆T式橋台
基礎形式	直接基礎
床版形式	RC床版 (t=16cm)
支承形式	鋼線支承
橋長	20,000mm
支間長	19,500
幅員構成	400+5,500+400=6,300
設計荷重	TL-14



(a) 側面図



(b) 平面図



(c) 断面図

図-2 一般図

2.2 小型FWD (Falling Weight Deflectometer) 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という形式の衝撃载荷試験である。今回の計測で用いた試験機は東京測器研究所製の FWD-Light (KFD-100A) である (図-3 a,b)。今回の計測では重錘落下高さ 1.0m、重錘重さ 25.0kg で対象部位に衝撃力を与える用途でのみ使用し、変位の計測は試験の都合上行わなかった。

2.3 加速度計測

今回の試験では小型 FWD 試験機による衝撃力によって発生する振動を加速度計を使用して計測を行った。使用した加速度計はサーボ式加速度計 (リオン LS-10C) を使用し (図-3 c)、データ計測は東京測器研究所製マルチレコーダ (TMR-200) を使用した。

2.4 試験方法

今回の小型 FWD 試験では 2 パターンでの計測を行い、各パターンから床版の挙動を把握し、床版の健全度評価を行う。



(a) 小型 FWD 試験機 (b) 重錘 (c) サーボ式加速度計

図-3 FWD 試験機・加速度計

ひとつは図-4 に示すように、主桁上を打撃し、橋梁全体の挙動を計測するパターンである。打撃箇所は支間中央の主桁上であり、3 箇所について計測を行った。また加速度計の配置は図に示すように、主桁の 1/4 点、支間中央 (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。

ふたつは図-5 (a) に示すように、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、8 箇所について測定を行った。また打撃点はパネル中央部とし、加速度計の配置は図-5 (b) に示すように、橋軸方向及び橋軸直角方向にパネル長さを等分するように 9 箇所に配置した。

各パターンとも共通に重錘重さは 25kg, 落下高さは 1.0m に設定し計測を行った。また加速度計の感度方向は鉛直方向である。

3 試験結果

3.1 主桁上計測

図-6 (a) に小型 FWD 試験による主桁上での鉛直方向の加速度波形の代表的な波形を示す。1.0sec 付近は打撃開始時刻でありここで加速度は最大値を計測している。打撃点での加速度はおおよそ 1500Gal~3000Gal であり、他の計測地点では 250gal~750Gal 程度であった。

計測された加速度波形は FFT (高速フーリエ変換) を

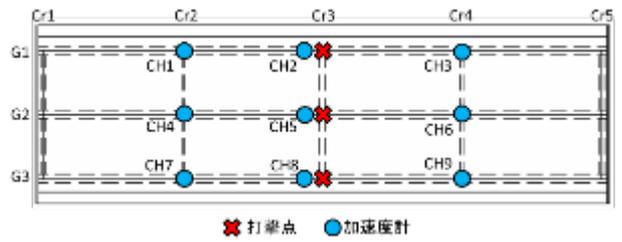
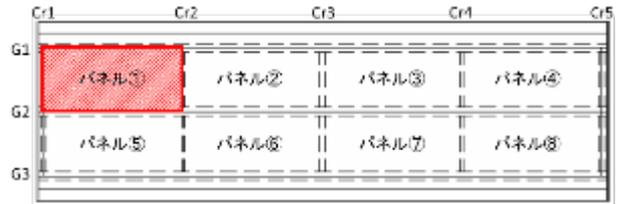
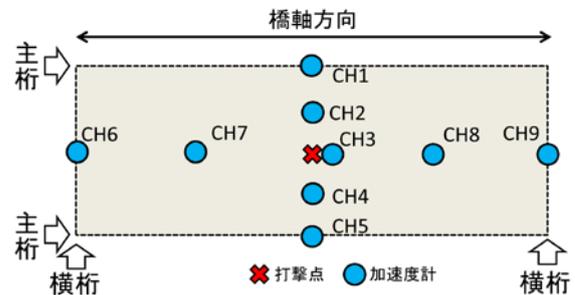


図-4 主桁上計測 機器配置

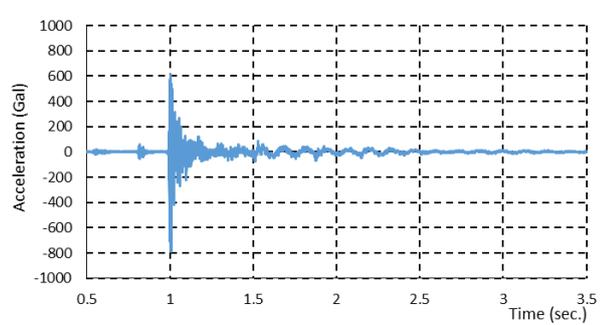


(a) パネル割

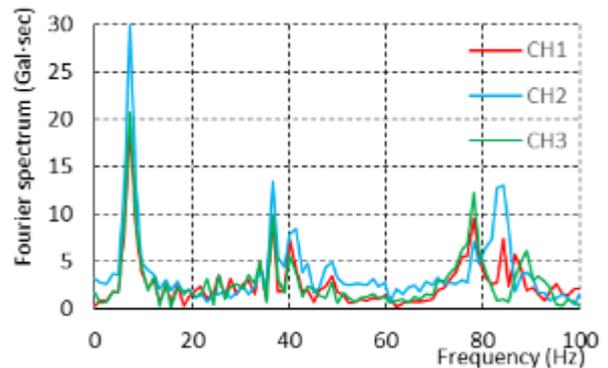


(b) 打撃点と加速度計の配置

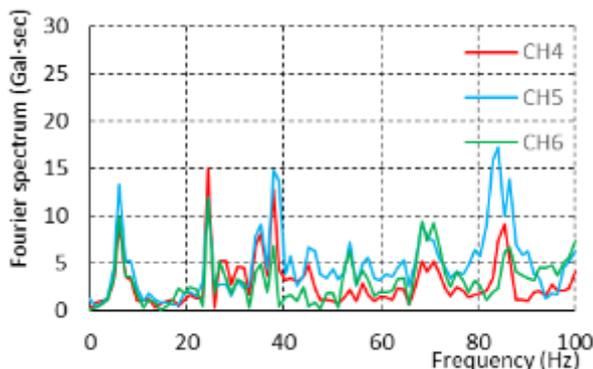
図-5 パネル計測 機器配置



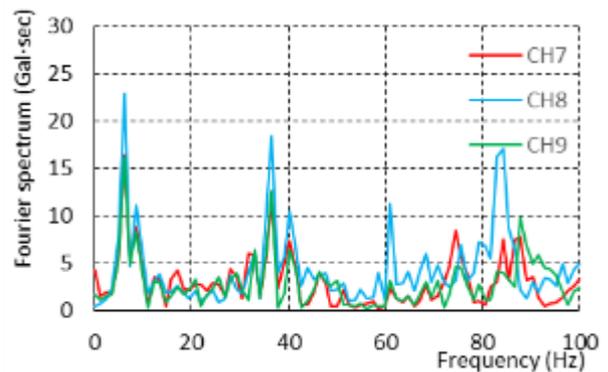
(a) 加速度波形



(b) G1 桁におけるフーリエスペクトル



(c) G2 桁におけるフーリエスペクトル



(d) G3 桁におけるフーリエスペクトル

図-6 主桁上計測結果

施し、フーリエスペクトルを基に分析、検討を行う。FFTにあたっては、サンプリング周波数 5kHz とし、データ数は 4096 個、打撃が終了した直後の 1.05sec 以降のデータを用いて FFT を行った。

図-6 に主桁上計測で得られた加速度のフーリエスペクトル図を示す。図-6 (b) は G1 桁上の支間中央を打撃した際の G1 桁上に配置した加速度計、CH1, CH2, CH3 のフーリエスペクトル図を示している。この図から各加速度計チャンネルで似たようなスペクトルをとっており、スペクトルのピーク値は 7.32Hz, 36.62Hz, 78.13Hz, 84.23Hz である。この値は橋梁全体系の固有振動周波数であると推測される。

図-6 (c) (d) も同様に G2 桁上, G3 桁上の支間中央を打撃した際の各加速度計チャンネルでのフーリエスペクトル図である。G2 桁でのスペクトルのピーク振動数は 7.32Hz, 24.41Hz, 37.84Hz, 85.45Hz である。G3 桁でのスペクトルのピーク振動数は 7.32Hz, 36.62Hz, 61.04Hz, 84.23Hz であった。

各桁とも 7.32Hz, 36.62Hz, 84.24Hz 付近は一致しているが他の周波数では各桁とも異なった値を示している。この結果については次節で FEM 解析の結果と共に考察を行う。

3.2 床版パネル計測

続いて床版を主桁と横桁に囲まれた範囲をひと計測範囲 (パネル) として計測を行った結果について述べる。

図-7 にパネル計測で計測された代表的な加速度波形を示す。1.0sec 付近は打撃開始時刻であり、ここで加速度は最大値を計測している。重錘は一回目の落下後、数回バウンドするため、図の矢印に示すように複数回、加速度のピーク値が計測された。

計測された加速度波形は主桁上での計測と同様に FFT を施し、フーリエスペクトルを基に分析、検討を行う。FFT にあたってはサンプリング周波数 10kHz とし、データ数は 4096 個、一回目の落下からバウンドして二回目の落下が始まる前までの間のデータを使用して FFT を行った。

図-8 に床版パネル計測で得られた加速度のフーリエスペクトル図を示す。ここでは紙面の都合上、パネル②及びパネル④の計測結果を示す。図-8 (a) 及び (c) は各パネルの橋軸直角方向に配置した加速度計の結果を示しており、図-8 (b) 及び (d) は橋軸方向の加速度計の結果を示している。各チャンネルの配置は先に示した図-5 (b) のようになっており CH3 は打撃位置である。各加速度のスペクトルを見ると共通の振動数でスペクトルのピーク値が見受けられる。図-8 (a) (b) のパネル②でのスペクトルのピーク振動数は 7.32Hz, 46.39Hz, 70.70Hz, 83.01Hz, 90.33Hz であった。図-8 (c) (d) のパネル④でのスペクトルのピーク振動数は 65.92Hz, 90.33Hz であった。しかし各パネル共通で、打撃位置から離れた CH1,

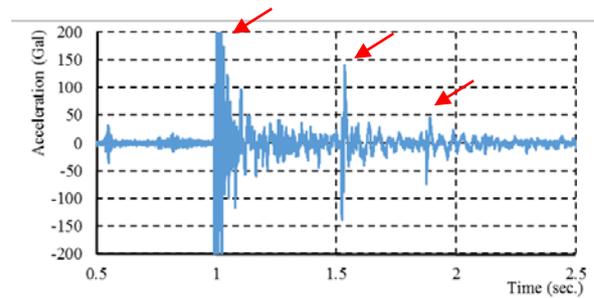
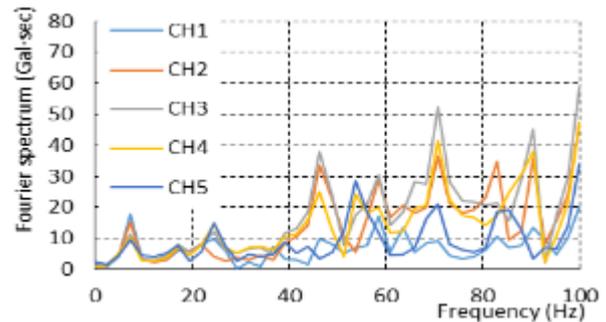
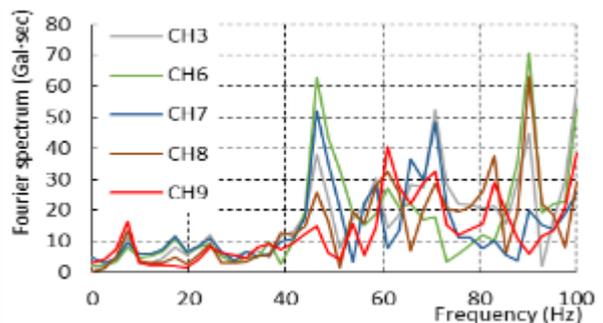


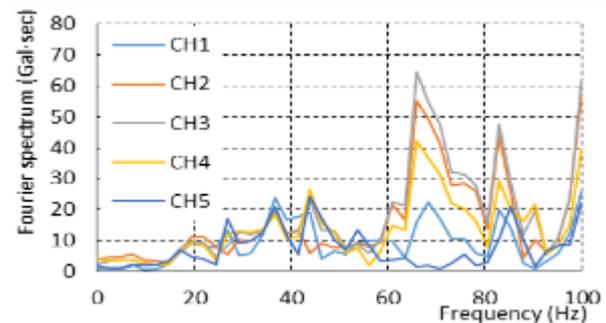
図-7 パネル⑥加速度波形



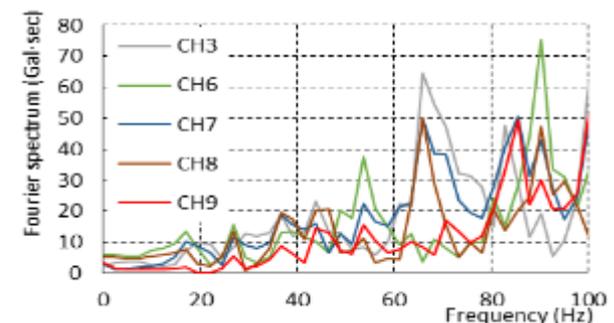
(a) パネル② 橋軸直角方向フーリエスペクトル



(b) パネル② 橋軸方向フーリエスペクトル



(c) パネル④ 橋軸直角方向フーリエスペクトル



(d) パネル④ 橋軸方向フーリエスペクトル

図-8 床版パネル計測結果

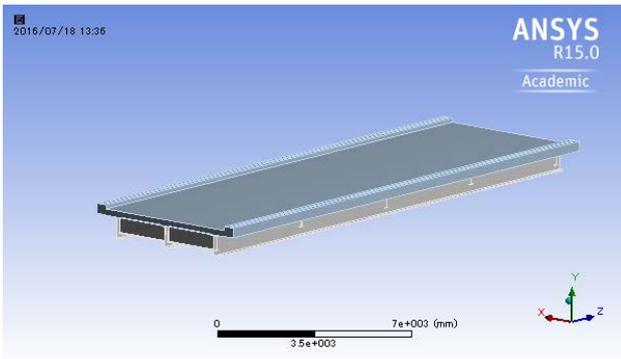


図-9 橋梁全体系モデル

CH5, CH6, CH9 は主桁上及び横桁上に配置したため他のチャンネルとは異なった傾向を示している。

4 モーダル解析

前章で示してきた小型 FWD 試験機による衝撃振動試験を解析によって再現することを目的に基礎的な段階として FEM モーダル解析を行った。

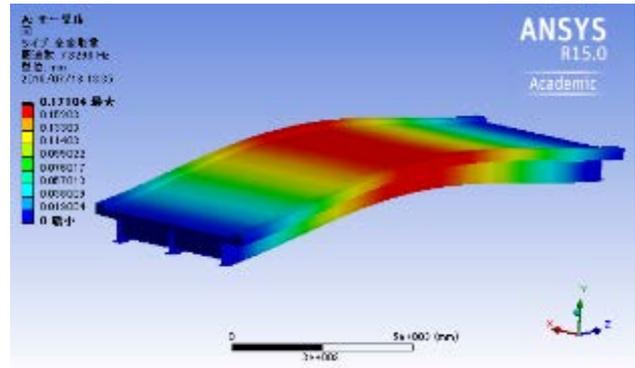
4.1 橋梁全体系モーダル解析

本解析で使用した FEM 解析ソフトは ANSYS15 Workbncch である。図-9 に橋梁全体系の解析モデルを示す。六面体、四面体のソリッド要素で、接点数 20 万、要素数 8 万でモデルを作成した。物性値は想定値であるが、RC 床版部は 30GPa、主桁及び横桁は 205GPa とした。

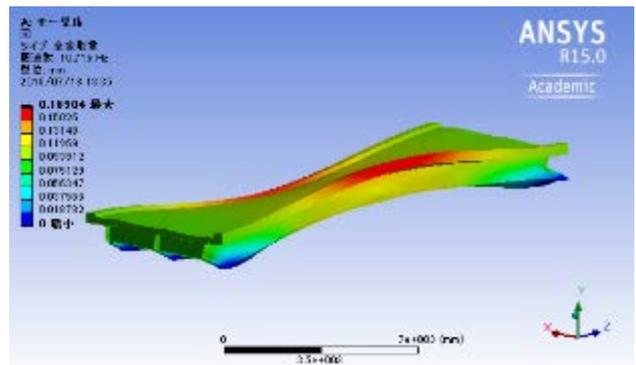
図-10 に本解析で得られたモーダル解析の固有振動数とモード形状の結果を示す。図-10 (a) は一次たわみ振動モードで 7.83Hz, (b) は一次ねじれ振動モードで 10.72Hz, (c) は二次たわみ振動モードで 16.71Hz, (c) は二次ねじれ振動モードで 18.19Hz であった。これに対し、図-6 の実測値では 7.32Hz, 36.62Hz, 84.24Hz がピーク振動数であった。36.62Hz, 84.24Hz については解析結果と同定することは不可能である。しかし、実測結果の 7.23Hz に関しては支間中央部を打撃したことから、解析結果の一次たわみ振動モードの 7.82Hz であると同定される。前述した 2011 年に行われた点検では腐食の評価は 5 段階評価で“b”，また亀裂，ボルトの脱落，破断は無しとされている。このことから主桁類の損傷は小さいと判断し、解析において主桁は健全であると仮定すると、橋梁全体系での解析から床版の全体的な剛性低下を評価することが可能であると推測される。

4.2 床版パネル系モーダル解析

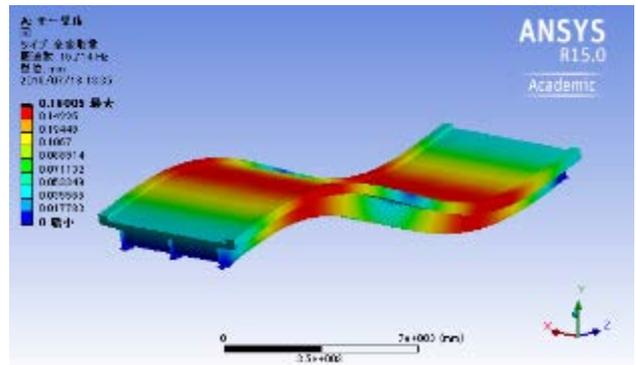
続いて床版パネル計測の再現を行うため、基礎的な段階として床版のみに着目したモーダル解析を行った。本解析に使用した解析モデルを図-11 に示す。床版パネル計測でひとパネルとした主桁と横桁で囲まれた範囲、5,000mm×2,250mm×210mm でモデルを作成した。支持



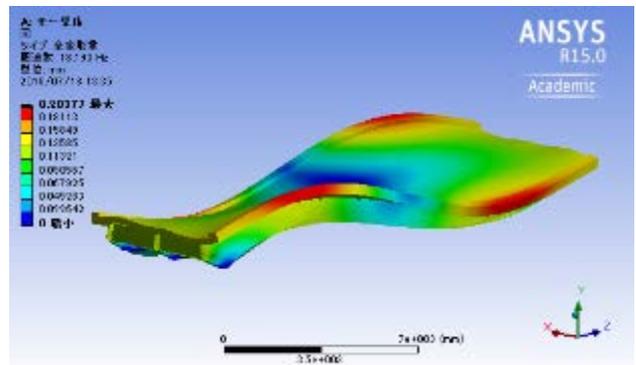
(a) 一次たわみ振動モード



(b) 一次ねじれ振動モード



(c) 二次たわみ振動モード



(d) 二次ねじれ振動モード

図-10 床版全体系モーダル解析結果

条件はモデルの下部の4辺を単純支持としている。計算の簡易化のため固定支持とせず、単純支持とした。図-12 にモーダル解析結果の一次から四次までのたわみ振動モード形状を示す。それぞれの振動数は一次から87.2Hz, 116.16Hz, 168.09Hz, 235.9Hzであった。実測値と比較すると比較的高い数値を示しており、本試験で使用したサーボ式加速度計の測定可能振動数の上限が100Hzであるので、解析結果から推定される値は一次たわみ振動モードの87.2Hzのみである。しかし、図-8の実測スペクトラムにあるようにピーク振動数が複数あることから各ピーク振動数がどの振動モードであるかは特定までは至らなかった。

5 まとめ

今回の小型 FWD 試験機を用いた衝撃振動試験結果、及びモード解析から以下の知見、今後の展望をえることが出来た。

- (ア) 小型 FWD 試験機を用いた加速度計測により橋梁全体系及び床版パネル系の動的特性をフーリエスペクトルより計測することは可能である。
- (イ) 主桁上計測及びパネル計測では、同一打撃点で得られた各加速度計のスペクトル波形はバラつきはあるが共通のピーク周波数を持っており固有振動数の推定を行うことが可能である。しかしフーリエスペクトルから健全度の評価を行うまでには至らなかった。
- (ウ) 今回小型 FWD 試験に関連したモーダル解析を初めて行い、橋梁全体系の挙動を把握することが出来た。しかし、実験結果との同定には不十分なところがあるため、解析精度、詳細モデル、また時刻歴応答解析を行い詳細に小型 FWD 試験の再現を目指した解析を行う予定である。

参考文献

- 1) 松井繁之 (2007) 『道路橋床版 設計・施工と維持管理』 森北出版
- 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

(2016年7月18日受付)

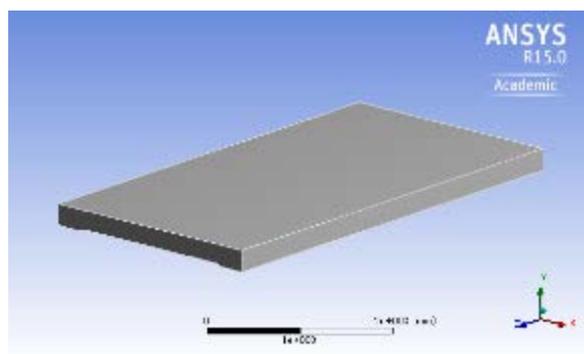
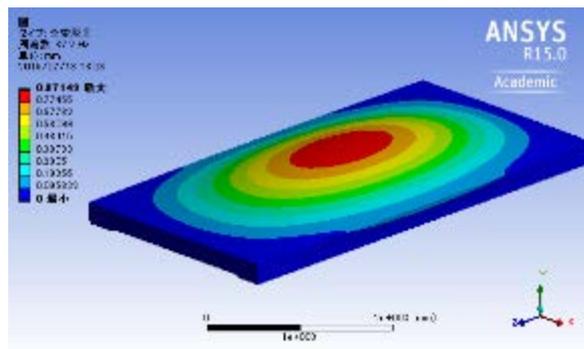
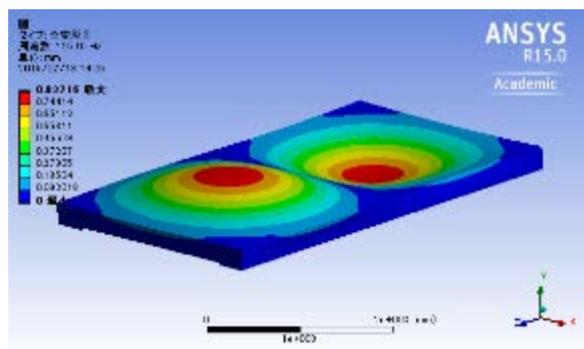


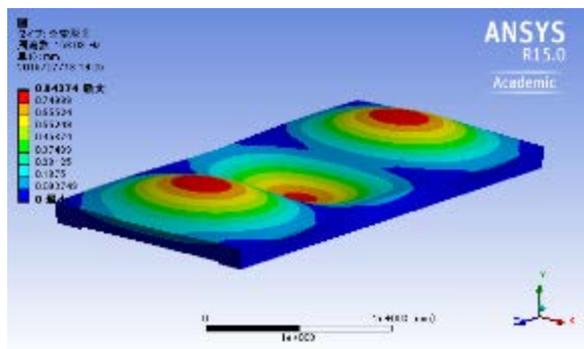
図-11 床版パネル系モデル



(a) 一次たわみ振動モード



(b) 二次たわみ振動モード



(c) 三次たわみ振動モード

図-12 床版パネル系解析結果