

筑波大学大学院博士課程

システム情報工学研究科修士論文

# STFDD 法による橋梁損傷のモード形状変化 に及ぼす影響の検知に関する研究

王 念祖

システム情報工学研究科

構造エネルギー工学専攻

指導教員 松島 亘志

2019年 3月

## 概 要

本論文は、Short Time Frequency Domain Decomposition (STFDD)法を用い、橋梁を渡る移動中の車両に搭載したセンサーから信号を処理し、橋梁のモード形状を出すことより橋梁損傷を検知する可能性を検討した。比較的に良いモード形状を推定するために、橋梁パラメータについて討論した。また、橋梁損傷の程度、位置、および実験車両の重量がモード形状に与える影響について検討した。

# 目次

第1章	はじめに	1
1.1	研究背景	1
1.1.1	社会環境	1
1.1.2	移動センシングの必要性	1
1.1.3	移動センシングに関する技術的な課題	1
1.1.4	損傷検知に関する技術的な課題	2
1.2	既往の研究	2
1.2.1	Tap-Scan 法	2
1.2.2	STFDD 法	3
1.3	本研究の目的・損傷検知性能の確認	3
第2章	手法	3
2.1	STFDD 法の概要	3
第3章	数値実験の概要	4
3.1	数値実験の基礎理論	4
3.1.1	車両-橋梁の相互作用に基づいた有限要素モデリング	4
3.1.2	橋梁モード形状とは	5
3.1.3	FDD 法	5
3.1.4	STFDD 法の補正手順	6
3.2	入力パラメータとシナリオ	7
3.2.1	橋梁健全時のモード形状	7
3.2.2	路面凹凸なし	9
3.2.3	路面凹凸あり	11
3.2.4	損傷時凹凸なし	18
3.2.5	損傷時凹凸あり	19
3.2.6	車両重さによるモード形状の変化	21
3.3	結果と考察	23
第4章	まとめ	23
	謝辞	24
	参考文献	24

## 図目次

図 1 .....	4
図 2.....	7
図 3.....	8
図 4.....	9
図 5.....	10
図 6.....	11
図 7.....	12
図 8.....	13
図 9.....	14
図 10.....	14
図 11.....	15
図 12.....	16
図 13.....	17
図 14.....	17
図 15.....	18
図 16.....	19
図 17.....	20
図 18.....	20
図 19.....	22
図 20.....	22

## 表目次

表 3-1 表の例 .....	8
-----------------	---

# 第1章 はじめに

## 1.1 研究背景

現在、橋梁の老朽化点検は主に目視点検により行われている。しかし、老朽化橋梁の増加している一方、技術者の育成が間に合わない状況である。したがって、一般化された橋梁の健全性を合理的に評価する指標が求められている。

### 1.1.1 社会環境

前述したように、橋梁の老朽化に伴い、点検コストの増加が地方財政の負担になっている。その上、既定されたマニュアルが少ないため、点検工事の発注においても、具体的にどのように点検を行うのか問題となっている。したがって、だれでも同じ精度で点検できる方法が求められている。計測した橋梁の振動データに基づく点検手法は一つの選択肢である。ただし、振動データの分析手法はまだ開発途上の技術であるため、実用化が課題である。

### 1.1.2 移動センシングの必要性

橋梁の動的特性は橋梁損傷分析の基礎となるが、その取り方が橋梁にセンサーを搭載し計測する伝統的な直接方法と、センサーを車両に搭載し車両の振動データから橋梁の動的特性を推定する間接方法 2 種類がある。伝統的な直接方法は現場で測量設備を設置する必要があるため、時間や金銭、人手などがかかり、高コストで不便である。それに対し、橋梁の動的特性の伝達者として橋梁上を移動する車両を使用する間接方法が提出された[1][2]。

間接方法では、橋梁の振動データが、移動する車両の振動データを処理することにより抽出される。ここでは、車両と橋梁の相互作用することより、車両が加振機と受信機 2 つの機能を果たしている。直接方法と比べ、必要な設備や設置の時間、現場の専門家などに対する需要が少なく、より高い経済性、効率性及び移動できることによる便利性を示した。

### 1.1.3 移動センシングに関する技術的な課題

間接方法の条件として、車両の振動データの中には高度的な橋梁振動応答が含まれる必要となるが、この方法の実現可能性は実際に Lin と Yang らの高速道路橋梁実験により確認された[3]。また、J.Q. Bu[4]らが提案した車両応答から橋梁状態を評価す

る方法を提案し、Yang ら[5]は Empirical Mode Decomposition(EMD)法を用い、その方法を改善した。それより、橋梁応答対車両応答の比率が大きくなるほど、抽出された橋梁の振動データの精度が高くなることが検証された。

ただし、Chang らは路面凹凸が車両応答の結果に与える影響が実際に無視できないと示した[6]。McGetrick らの研究により[7]、路面凹凸が車両に与える影響は車両の速度とともに上昇し、橋梁の振動を隠してしまうため、測定時の速度は低ければより高い精度が得られる。そして、橋梁の減衰変化が実験車両より効率的に観察できると示した。それに対し、改造された実験車両を用い、橋梁の固有振動数と減衰率を検知する可能性を検討するために、Kim ら[8]と Yang ら[9]が実験した。その中で、路面凹凸の影響を最小化するために Yang らは連結された 2 台の車両を利用した。車両応答から橋梁の減衰率を推定するためにはいくつかの手法が提案された[10][11][12]。しかし、これらの手法では、常に有効であるというわけではない。ただし、J.Keenahan らが車両振動データの減算というアイデアを提案し、それより得られた結果を用い、橋梁の減衰変化を検出した[13]。

#### 1.1.4 損傷検知に関する技術的な課題

近年、移動車両の振動応答信号から橋梁の固有振動数を検知し、およびその結果の精度を向上する課題に対し、何人かの研究者が幾つかの方法を提案した[1][2][11][12]。その上に、車両振動と用いた間接手法により、橋梁の減衰率を検知するいくつかの研究が進められたが[10][13]、橋梁のモード形状を推定する研究はまだ多くない。橋梁に亀裂の損傷がある場合、モード形状では損傷点に不連続性が生じると、研究より示され[14][15]、さらにモード形状が橋梁のモデル更新では重要なツールとして利用できる[16]。なので、橋梁のモード形状は橋梁の振動調査で非常に重要な指標の一つである。

## 1.2 既往の研究

### 1.2.1 Tap-Scan 法

向志海らが構造物へのタッピング実験をベースにした損傷検知方法を開発した[21]。具体的なやり方としては、まず、センサーを装備したタッピング装置を構造物の表面上の位置ごとで叩きスキャン操作を行う。装置の加速度と構造物凹凸及び叩く力などの関係が決められた近似式で表す。得られた加速度信号を時間段階ごとに変換処理を行い、スペクトログラムを作成する。また、事前に設定した叩きのカバーする周波数帯域と対応するスペクトルエン

ベローブを、スペクトログラムで切り取り、それをスペクトルで記録し、2つごとで MAC 値を計算しマトリクスを作成する。それより、ある行の値を基準としたら、構造物位置に関するモーダル保証基準値(Modal Assurance Criterion-MAC)曲線が得られ、構造物の損傷位置と損傷程度は曲線の傾斜が現れる位置とその傾斜度で判断できる。ただし、この方法の再現性可能性が検討されている一方、叩きのカバーする周波数帯域の変化が結果に与える影響や、高精度の結果を得るために各構造物の属性に対し周波数帯域の決める方法はまだ研究されていない。

### 1.2.2 STFDD 法

Brincker らが、直接計測した橋梁の振動データを用い、橋梁特性パラメータを推定する Frequency Domain Decomposition (FDD)法を提案した[17]。前述したように、橋梁の測定は不便性があるため、この FDD 法に基づき、A.Malekjafarian は車両応答を用いる Short Time Frequency Domain Decomposition(STFDD)法を提案した[18]。この手法は橋梁をセグメントに分かれ、各セグメントに FDD 法を適用し、得られた局所的なモード形状を組み合わせ、橋梁全体のモード形状を作成した。

## 1.3 本研究の目的・損傷検知性能の確認

前述したように、車両振動応答を用い橋梁モード形状を推定する STFDD 法は提案された。ただし、橋梁が損傷した時にモード形状へ与える影響が実際に見られるかどうか、またその影響の反映程度はまだ検討されていない。本研究は、STFDD 法を用い、橋梁の損傷からもたらすモード形状の変化及び車両や橋梁などの実験条件の変化によりもたらす影響を検討する。

## 第2章 手法

### 2.1 STFDD 法の概要

1.2.2 で述べたように、STFDD 法は、離散的な短い時間間隔で 2 つの車軸に設置されたセンサーから測定した信号に基づき、FDD 法を適用する。この手法は具体的に 2 つの部分がある。まず、橋梁を一定的な長さの複数のセグメントに分かれて定義し、車両を走行させ、それらのセグメントに対し多段階的の計測を行う。前後 2 つの車軸で計測した車両応答を時間履歴で、段階ごとに FDD 法を用い解析する。結果として、各セグメントの局所モード形状が得られる。次に、全体のモード形状を構築するために、これらの局所モード形状に補正手順を行う。このように、マルチプルのステップからシステムモード形状が得られる。ここでは、システムモード形状をブリッジモ

一ド形状の近似とみなしている。著者が方法の有効性と性能を検証するために、有限要素法(Finite Element-FE)に基づき Vehicle Bridge Interaction (VBI)法を用いた。そして、路面凹凸の影響を減少するために、実験車両以外の車両の通過による加振および後続車両の振動応答との減算と、2つの手法を利用した。この検証方法は前後車軸にそれぞれ1つだけのセンサーを装置したため、構造的に複数のセンサーを設置する必要がある従来のモーダル実験より効率的である。そして、複雑さを減らすために実験速度を一定値にすることが勧められるが、実験特性により、車両が走行するセグメントに対応する時間帯が分れば推定ができるため、速度を必ず一定にする制限もない。

## 第3章 数値実験の概要

### 3.1 数値実験の基礎理論

#### 3.1.1 車両—橋梁の相互作用に基づいた有限要素モデリング

数値分析用の車両と橋梁のモデルは図2のように、Keenahanらが使用した有限要素法に基づくVBIシステム[13]を利用し作成する。

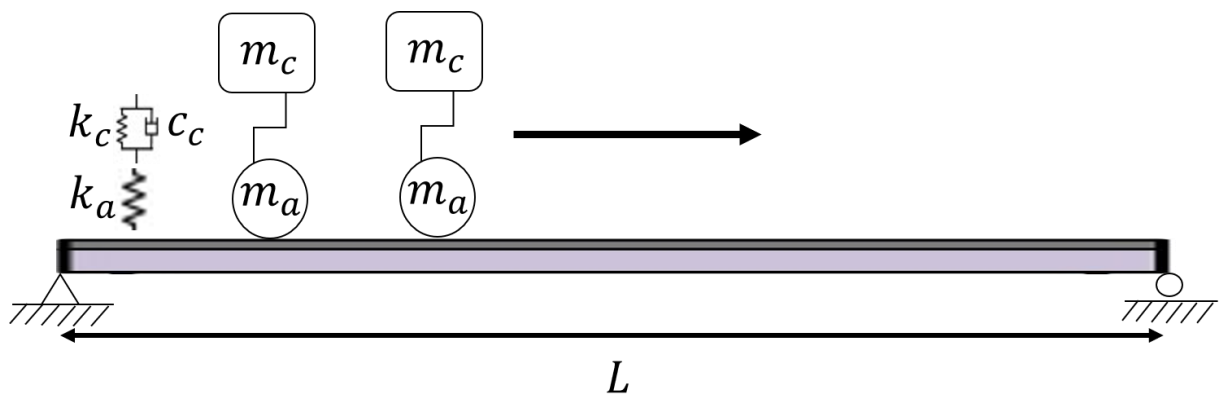


図 1

橋梁モデルは有限要素法を使用し、長さが  $L$  の単純支持梁スパン橋にモデル化した。ここで、橋梁の節点を 100(節点あたり 2 自由度)とし、単位長さ当たりの質量  $m$ 、弾性係数  $E$ 、断面 2 次モーメント  $I$  が一定とする。ここで、橋梁の運動方程式は橋梁が移動する車両から受けら力を考慮し、次式で表す。

$$M_b \ddot{y}_b + C_b \dot{y}_b + K_b y_b = F \quad (1)$$

ただし、ここで  $\ddot{y}_b$ 、 $\dot{y}_b$  及び  $y_b$  は橋梁要素ごとの加速度、速度、および変位のベクトルであり、 $M_b$ 、 $C_b$ 、 $K_b$  はそれぞれ橋梁の質量、減衰、剛性のマトリクスとなる。 $F$  は橋梁と車両の相互作用する力である。そして、実際の橋梁内部では構造により複雑なメカニズムになる可能性があるが、ここで考慮する橋梁は単純構造であり、減衰比は低く考えられ、粘性減衰として使用される。したがって、 $C_b$  は次式で表す。

$$C_b = \alpha M_b + \beta K_b \quad (2)$$



ここで $\alpha$ と $\beta$ はともに定数である。

車両モデルは、クォーターカーを接続せず、単純化された2軸車両として使用される。各クォーターカーは図示のように、質量 $m_c$ の車体と質量 $m_a$ の軸がばね定数 $k_b$ 、減衰定数 $C_a$ のばねで繋いで構成されている。その中で、それぞれのクォーターカーには車体の変位 $y_c$ と軸の変位 $y_a$ に対応した2つの自由度を持っている。そして、車軸と路面の間ではばね定数 $k_a$ のタイヤで接続されている。車両モデルの運動方程式は車両に作用する力と車両のモーメントを考慮し、次式で表す。

$$M_v \ddot{y}_v + C_v \dot{y}_v + K_v y_v = F \quad (3)$$

ただし、 $\ddot{y}_v$ 、 $\dot{y}_v$ 及び $y_v$ は車両節点ごとの加速度、速度、および変位のベクトルであり、 $M_v$ 、 $C_v$ 、 $K_v$ はそれぞれ車両の質量、減衰、剛性のマトリクスとなる。

車両—橋梁のVBIシステムはMATLABを通じ実行する。式(1)と(3)を合わせ、VBIシステムの運動方程式は次式で表す。

$$M_s \ddot{u} + C_s \dot{u} + K_s u = F \quad (4)$$

ただし、 $u$ は車両変位と橋梁変位のベクトル $\{y_v, y_b\}^T$ であり、 $M_v$ 、 $C_v$ 、 $K_v$ はそれぞれシステムの質量、減衰、剛性のマトリクスとなる。

### 3.1.2 橋梁モード形状とは

一般に構造物は連続体であり、無限のモードをもつ。ある固有値における振動は、決まった形をしており、モード形状という。周波数の低い方から1, 2, 3...次モードでと呼ばれる。式で表すと

$$[M^{-1}K] = U \Sigma U^T \quad (5)$$

ここで、 $\Sigma$ は固有振動角数マトリクス、 $U$ はモード形状マトリクスである。実際の場合、この式で理論解を求めることは難しく、ここではFDD法より、振動分析からモード形状を推定する。

### 3.1.3 FDD法

橋梁の多点計測で得られる周波数応答関数行列 $H(\omega)$ は、交通荷重 $F(\omega)$ 及び橋梁応答 $Y(\omega)$ を用いて

$$\mathbf{Y}(\omega) = \mathbf{H}(\omega)\mathbf{F}(\omega) \quad (6)$$

である。 $\mathbf{Y}(\omega)$ のクロスパワースペクトル $\mathbf{G}_{yy}(\omega)$ ベクトルは

$$\begin{aligned} \mathbf{G}_{yy}(\omega) &= \mathbf{H}(\omega)\mathbf{F}(\omega)\mathbf{F}^H(\omega)\mathbf{H}^H(\omega) \\ &= \mathbf{H}(\omega)\mathbf{G}_{FF}(\omega)\mathbf{H}^H(\omega) \end{aligned} \quad (7)$$

と表せる。 $\mathbf{Y}(\omega)$ が未知であるため、 $\mathbf{G}_{yy}(\omega)$ も未知である。パワー平均が周波数と加振点によらず一定であると仮定すると、式

$$\mathbf{G}_{FF}(\omega) = \begin{bmatrix} f^2 & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \dots & f^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

が得られる。長江ら[19]の次式により

$$\begin{aligned} \mathbf{G}_{yy} &= f^2 \mathbf{H}(\omega)\mathbf{H}^H(\omega) \\ &= f^2 \sum_{r=1}^N \left( \frac{\phi_r \phi_r^H}{j\omega - \lambda_r} + \frac{\phi_r^* \phi_r^T}{j\omega - \lambda_r^*} + \frac{\phi_r \phi_r^H}{-j\omega - \lambda_r} + \frac{\phi_r^* \phi_r^T}{-j\omega - \lambda_r^*} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

$\mathbf{G}_{FF}^+$ が $\mathbf{FRF}$ と同様のモーダルパラメータに関する情報を持っていることが示された。

そして、その正の遅延成分 $\mathbf{G}_{yy}^+(\omega)$ は次の式になる。

$$\mathbf{G}_{FF}^+(\omega) = f^2 \sum_{r=1}^N \left( \frac{\phi_r \phi_r^H}{j\omega - \lambda_r} + \frac{\phi_r^* \phi_r^T}{j\omega - \lambda_r^*} + \frac{\phi_r \phi_r^H}{-j\omega - \lambda_r} + \frac{\phi_r^* \phi_r^T}{-j\omega - \lambda_r^*} \right) \quad (10)$$

ここでは、Brinckerら[20]の方法に従い、 $\mathbf{G}_{yy}^+(\omega)$ にSVD法を適用しモード形状を求める。

$$\mathbf{G}_{FF}^+(\omega) = \mathbf{U}_i \mathbf{S}_i^+ \mathbf{U}_i^H \quad (11)$$

$\mathbf{U}_i$ はユニタリ行列で、各モード形状ベクトル $\phi_r$ の推定値 $\widehat{\phi}_r$ からなる。また、 $\mathbf{S}_i^+$ は特異値を対角成分に持つ対角行列である。

### 3.1.4 STFDD法の補正手順

図1により、車軸間隔は $\mathbf{S} = \mathbf{L}/n$ であり、ブリッジは $n$ 個のセグメントに分割され

ている。各段階で、振動数及びそれと対応する局所モード形状を表す $\ddot{y}_{jj}$ と $\varphi_{jj}$ は得られる。補正比率は共通セグメントについて得られたローカルモード形状要素に基づき定義でき、異なるステージからのローカルモード形状ベクトル間の関係が確立できる。橋梁の各セグメントからの測定信号がそのセグメントのブリッジの動的挙動を表すことである。

$$\Phi_1 = \varphi_{11} \quad (12)$$

$$\Phi_2 = \varphi_{12} \quad (13)$$

$$\Phi_3 = \varphi_{23} \frac{\Phi_2}{\varphi_{22}} \quad (14)$$

$$\Phi_{j+1} = \varphi_{j,j+1} \frac{\Phi_j}{\varphi_{jj}} \quad (15)$$

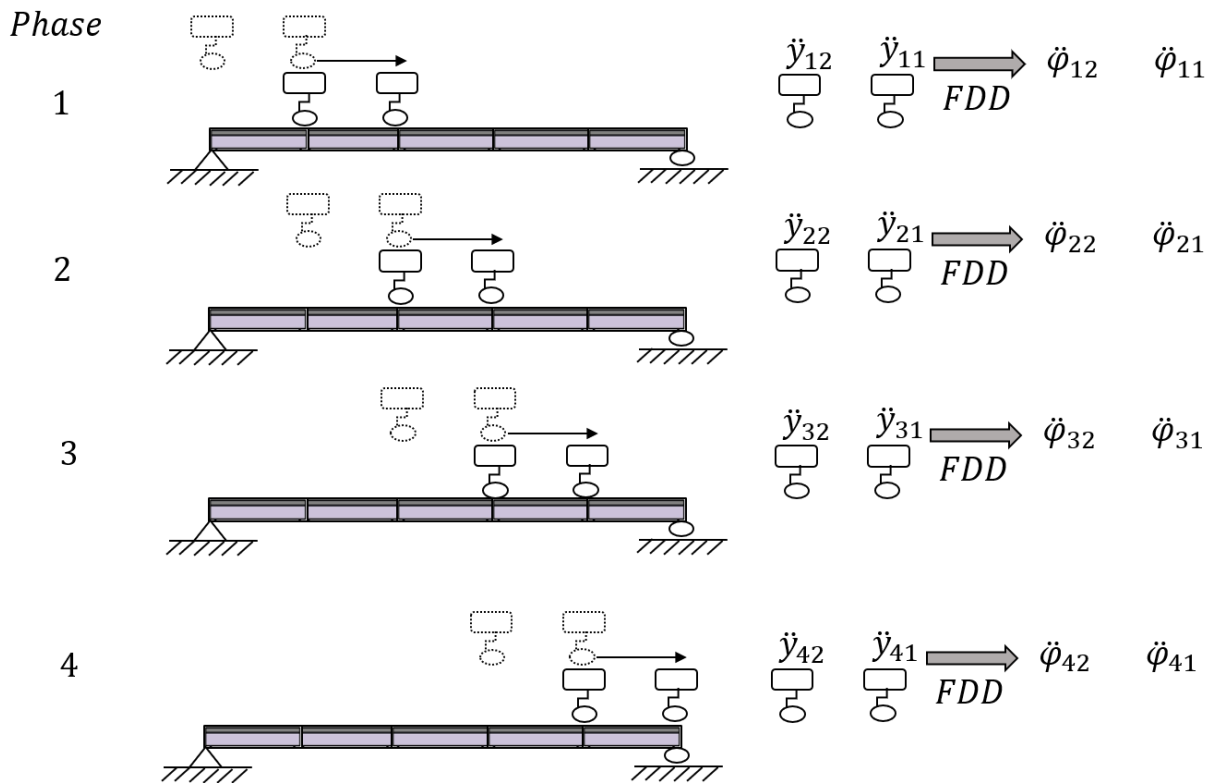


図 2

## 3.2 入力パラメータとシナリオ

前述した VBI 法を利用し、MATLAB でシミュレーションを行う。ただし、ここで車両の速度は 2m/s、解析時間刻みは  $dt=0.001s$  とする。

### 3.2.1 橋梁健全時のモード形状

まず、単純支持梁スパン橋が健全である時に、有限要素法より橋梁のモード形状を

推定する。このただし、橋梁と車両の各特性パラメータは A.Malekjafarian が使ったデータで[18]、それぞれ表 3-1 と表 3-2 で示される。

表 3-1 橋梁特性パラメータ

Properties	Symbol	Unit	Value
Length	L	m	86
Mass per unit	m	kg/m	$3 \times 10^3$
Flexural rigidity	EI	Nm <sup>3</sup>	$1.56 \times 10^{10}$
Frequency of mode1	f2	Hz	5.65
Frequency of mode2	f1	Hz	22.62

表 3-2 車両特性パラメータ

Properties	Symbol	Unit	Value
Car body mass	$m_c$	kg	9300
Axle mass	$m_a$	kg	350
Suspension stiffness	$k_c$	N/m	$4 \times 10^5$
Suspension damping	$c_c$	N s/m	$10 \times 10^3$
Tyre stiffness	$k_a$	N/m	$1.75 \times 10^6$
Body bounce frequency	$\omega_c$	Hz	0.94
Axle hop frequency	$\omega_a$	Hz	12.48

有限要素法より推定された橋梁の 1、2 次モード形状は図 3 となる。

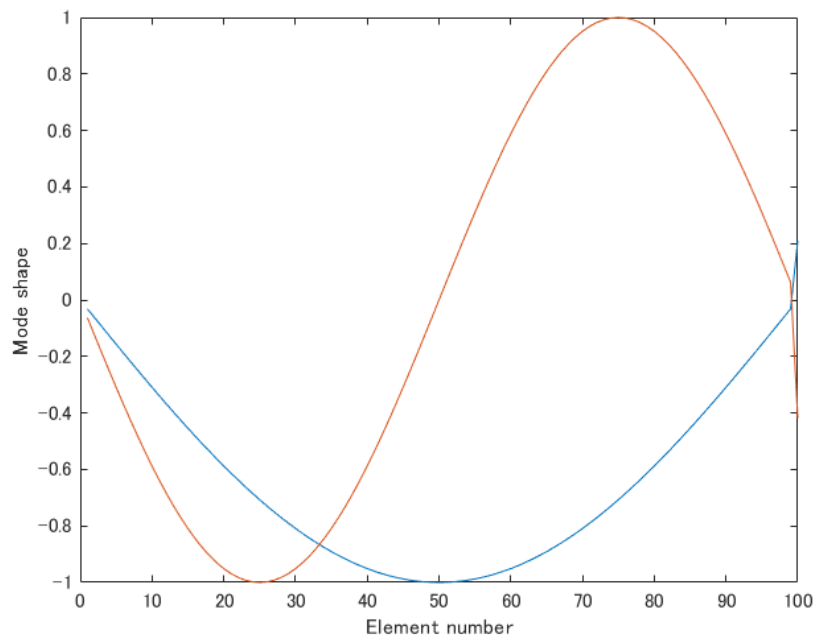


図 3

### 3.2.2 路面凹凸なし

車両が橋梁を通過する時の運動曲線は図 4 に示される。ここで、黒色の実線と点線は車両の前後車体、赤色の実線と点線は車両の前後軸、青色の実線は橋梁中点、とそれぞれの変位を表している。STFDD 法により、橋梁を 2 軸車両の軸間距離で 10 等分し、応答から推定された各段階の SVD 図は図 5 となり、ピークから得られる特異値に対応する振動数は各セグメントの固有振動数となる。橋梁固有振動数から推定された各セグメントのモード形状に補正手順を行い、組み合わせた橋梁のモード形状は図 6 のようになる。

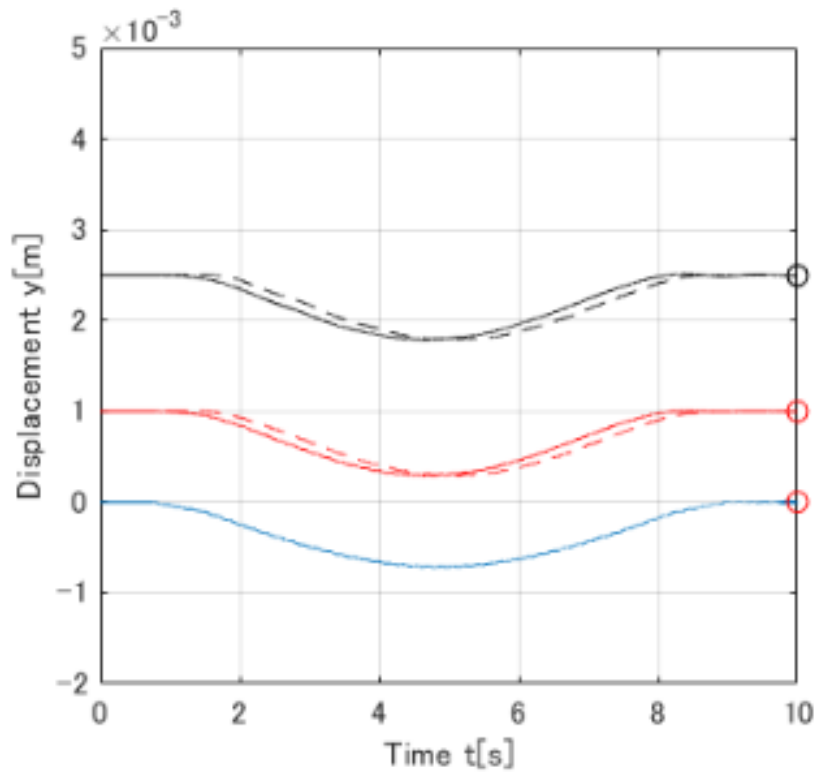
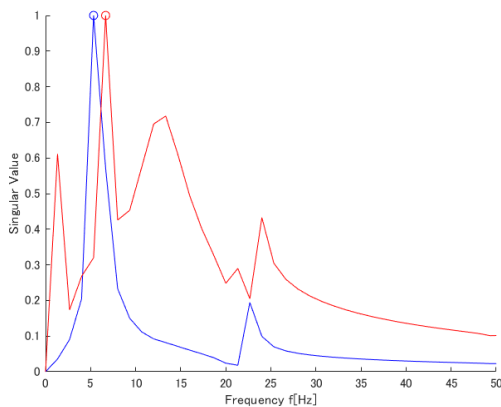
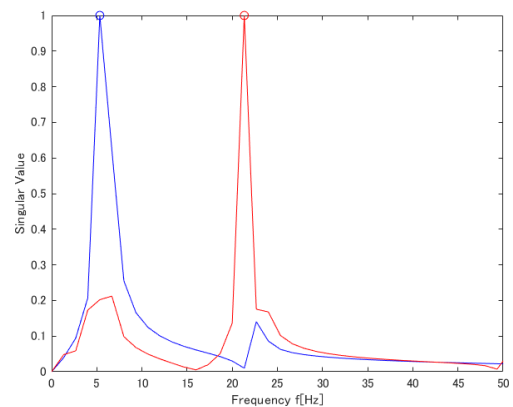


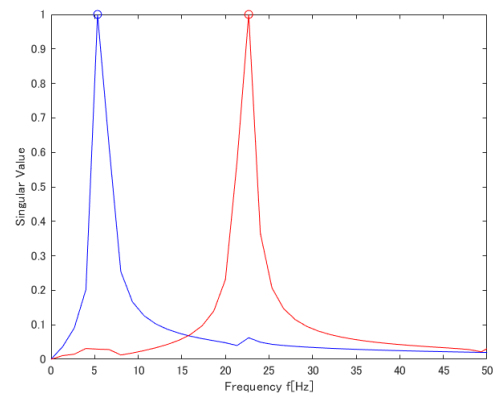
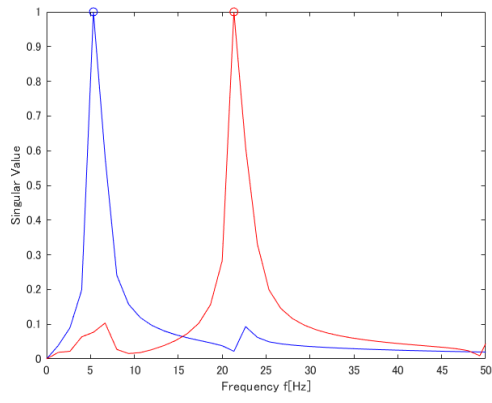
図 4



1

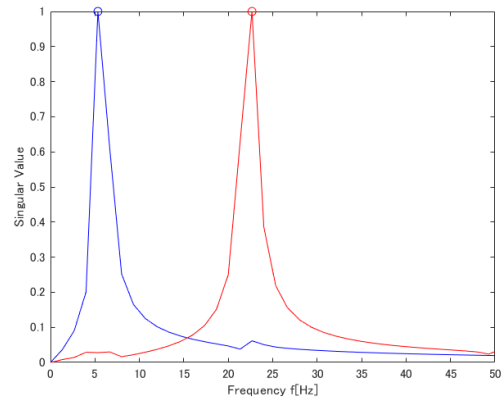
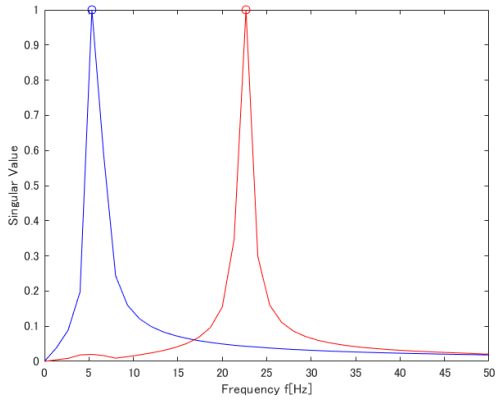


2



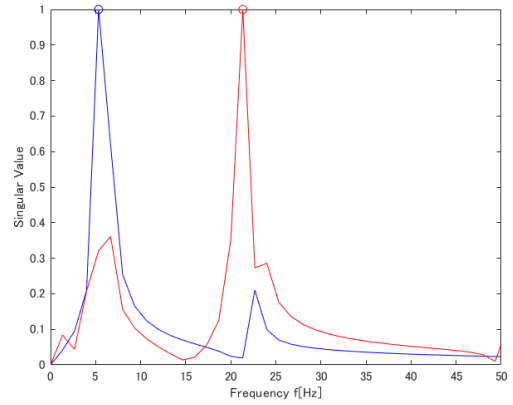
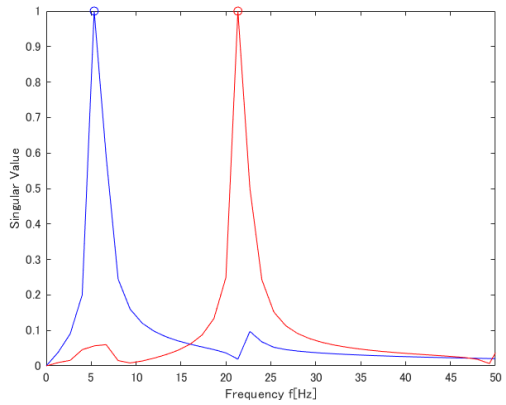
3

4



5

6



7

8

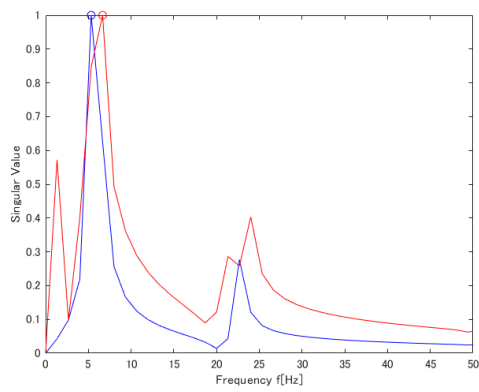


图 5

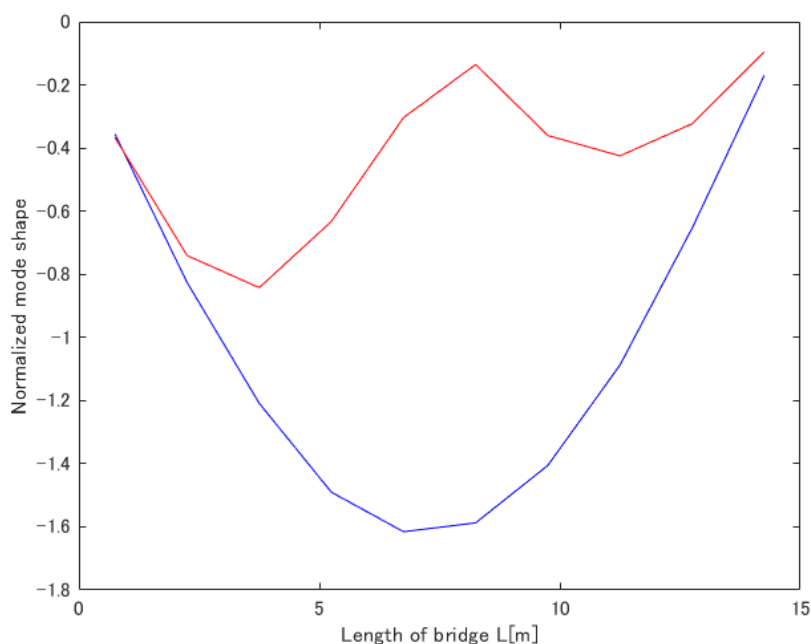


図 6

表 3-1 から分かるように、橋梁の 1、2 次固有振動数がそれぞれ 5.65Hz、22.62Hz である。その 2 つの値と比べ、図 5 の段階 2 から段階 8 まで、ピーク値が対応する振動数が一致していると言える。ただし段階 1 と段階 9 でずれが生じたのは、端の境界条件が主要な原因と考えられる。

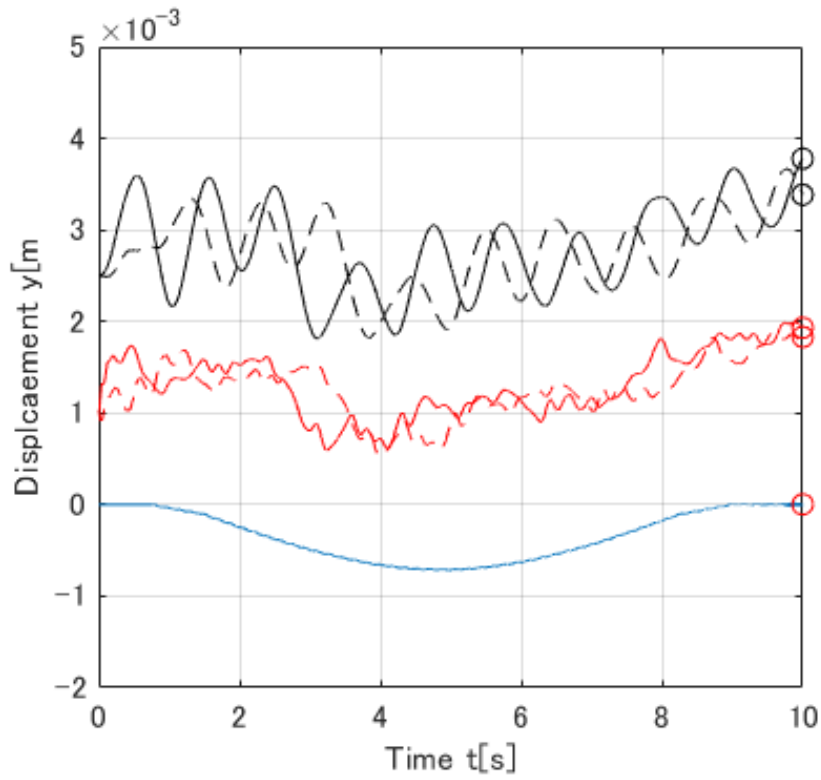
モード形状の比較指標とし、推定されたモード形状  $\Phi_{STFDD}$  と有限要素法で得られたモード形状  $\Phi_{FE}$  の MAC 値を利用する。MAC 値は次式で定義され(t は行列の転置)、主に曲線の相似度を評価する重要な指標としてよく利用されている。

$$MAC = \frac{|\Phi_{STFDD}^t \Phi_{FE}|^2}{|\Phi_{STFDD}^t \Phi_{STFDD}| |\Phi_{FE}^t \Phi_{FE}|_i} \quad (16)$$

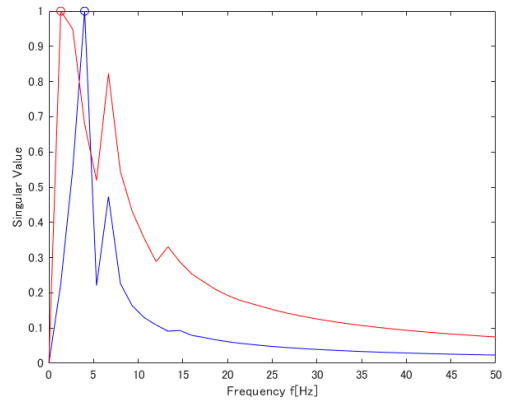
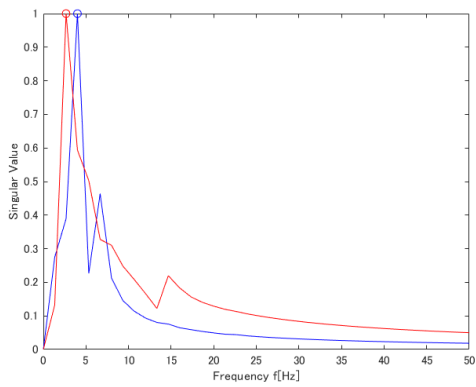
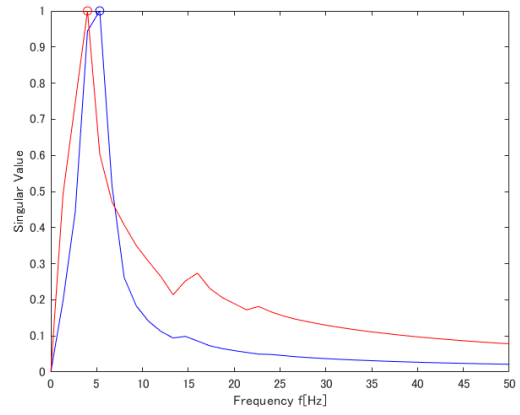
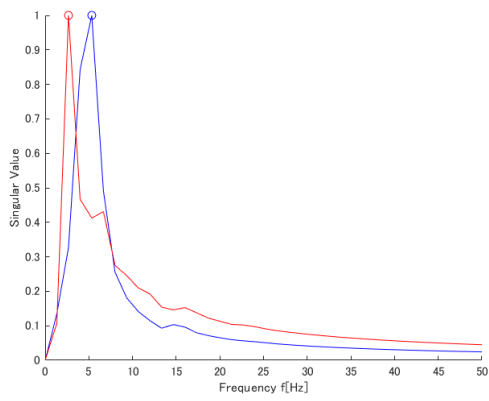
上式で計算した 1 次モード形状の MAC 値は 0.9967 となり、かなり高度な一致性が見られる。ただし、2 次モード形状の結果は相似とも言えないのである。

### 3.2.3 路面凹凸あり

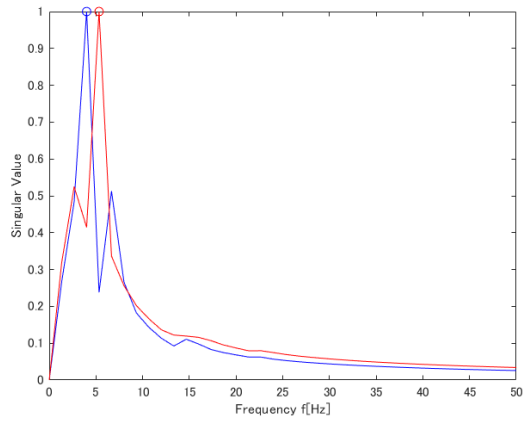
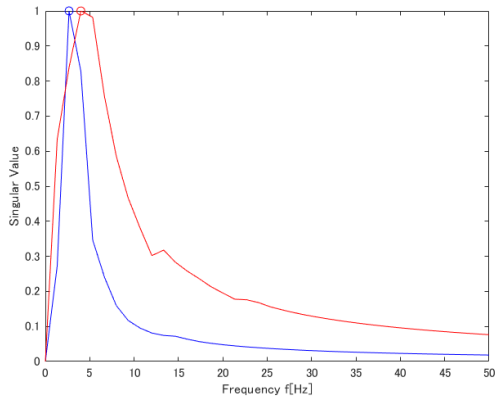
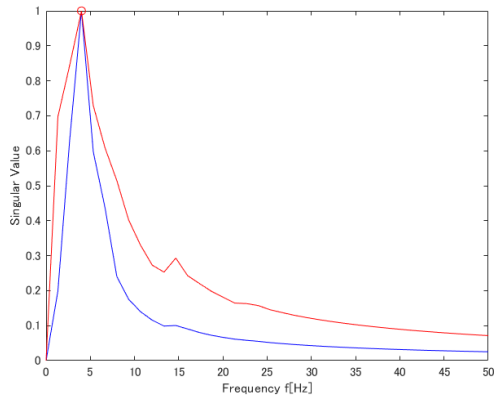
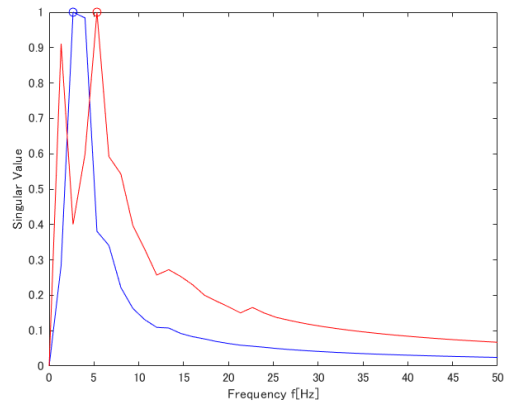
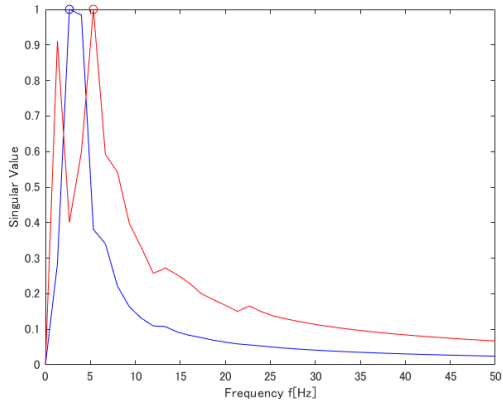
次に、STFDD 法を橋梁の凹凸状況を考慮しながら実行する。路面凹凸状況は ISO 標準での A クラスに従いランダムに作成された。車両運動曲線は図 7 で示される。SVD 図と推定された橋梁モード形状はそれぞれ図 8、図 9 で表す。



7







8

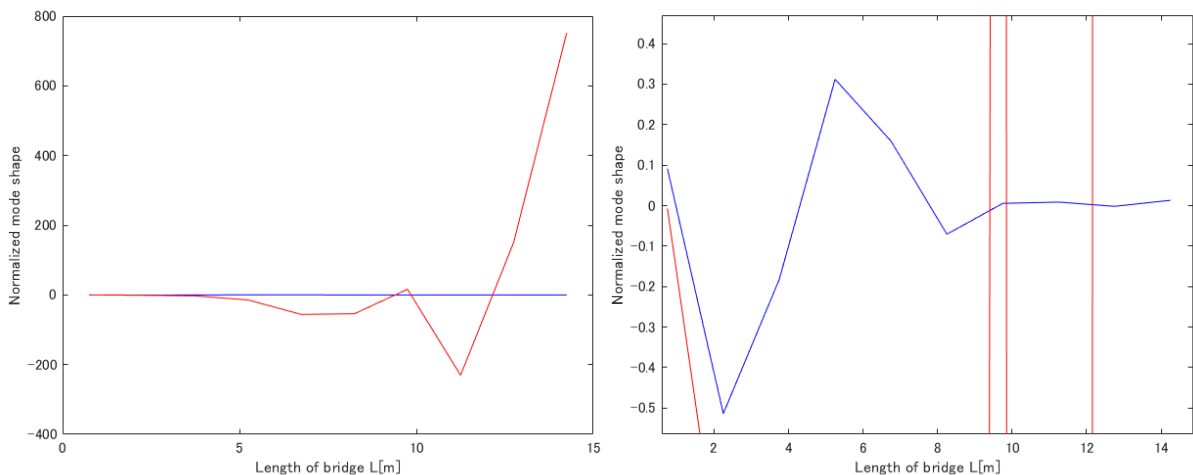


図 9

図 4 と図 7 を比較すると、車両の振動状況は凹凸のないほうより大幅に揺れている。そして、各段階で得られた SVD 図から、ピーク値が対応する振動数は橋梁振動数でなく、車両の軸振動数 12.48Hz と近似している。MAC 値を計算する必要もなく、推定されたモード形状は路面凹凸からかなりの影響を受けていることがわかる。

路面凹凸の影響を除去する一つの手法とし、一つの方法は Yang ら [9] と J.Keenahan ら [13] が提出した軸振動応答の引き算方法がある。この方法は、軸の振動応答を利用するのではなく、同じ路面と通過した軸の振動応答を引き算し、その結果をソースデータとして利用する。ここでは、この手法を利用し STFDD 法を実行する。ただし、それに応じ、車両モデルにもう 1 つの軸を追加する必要がある(図 9)。

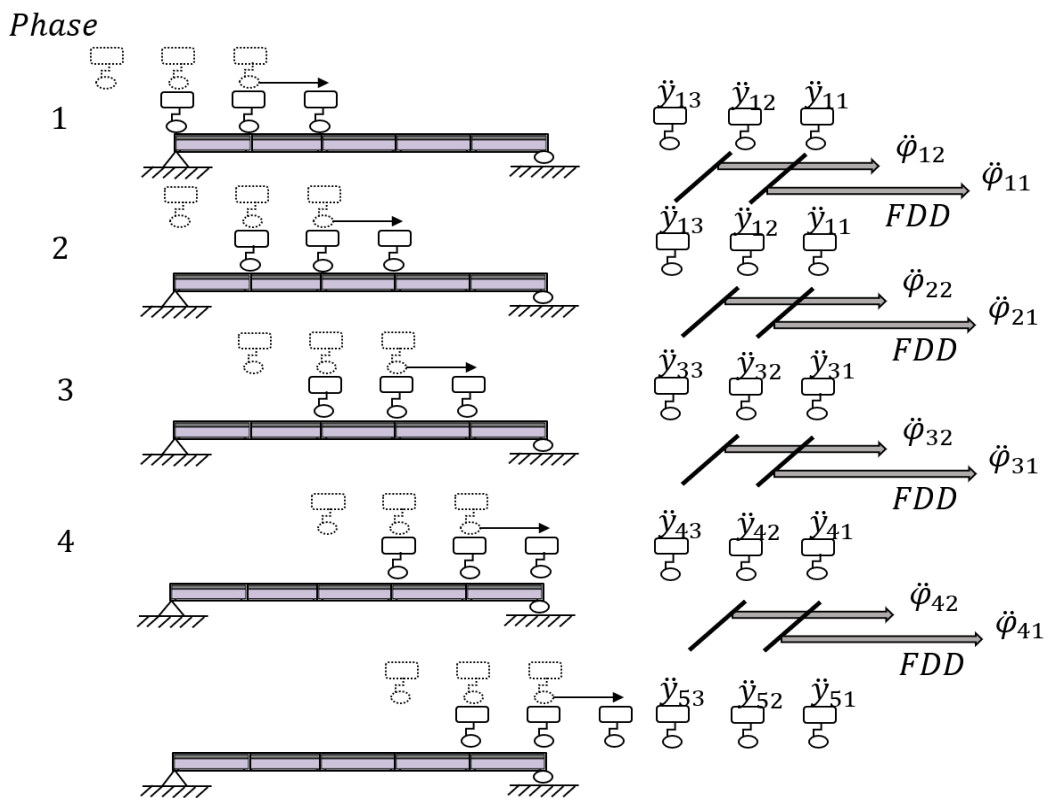


図 10

この手法より、車両3つの軸の運動曲線、SVD 図及び推定された橋梁モード形状はそれぞれ図9、図10、図11で表す。

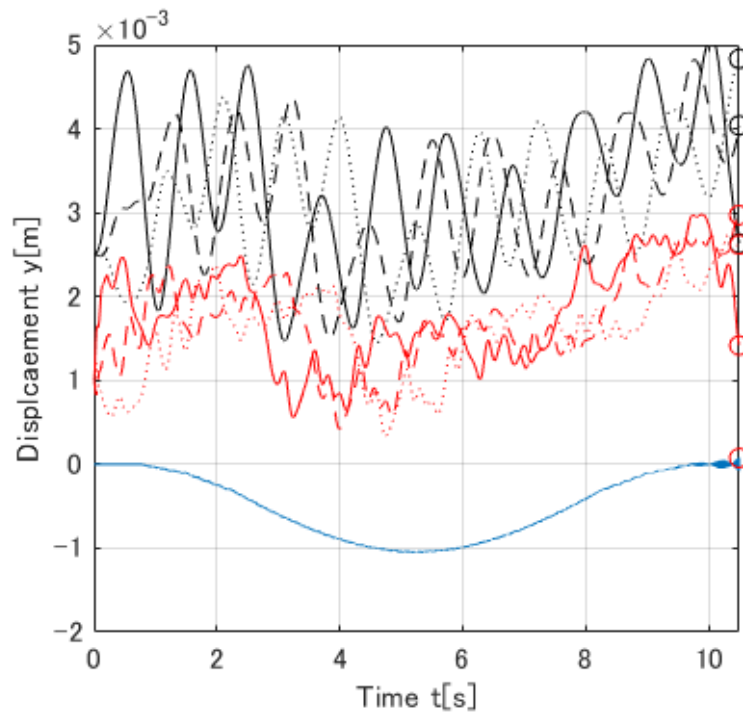
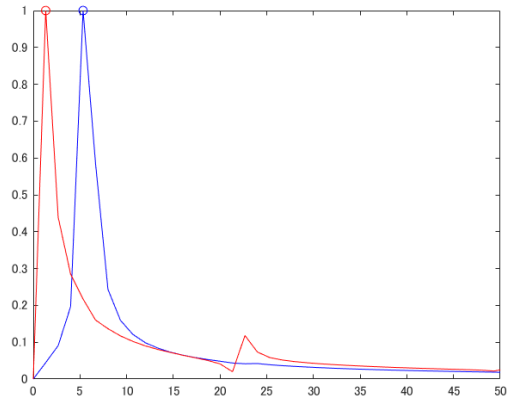
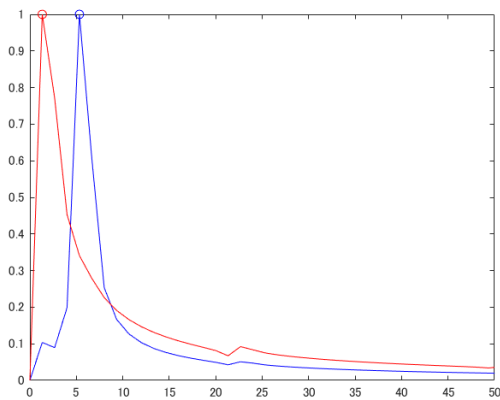
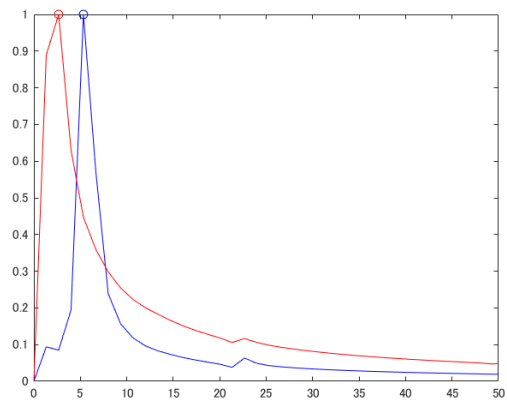
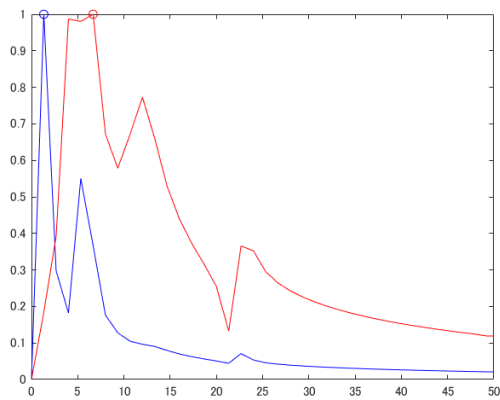


図 11



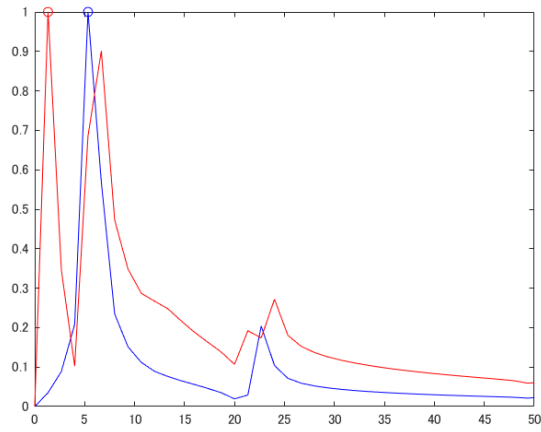
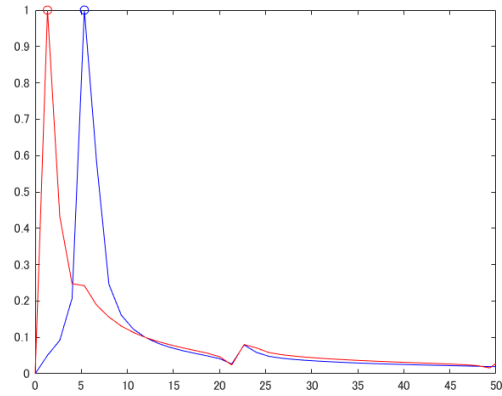
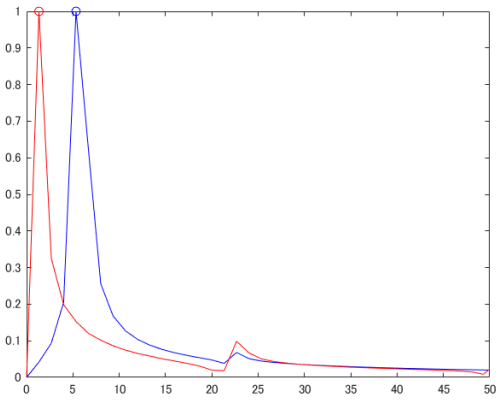
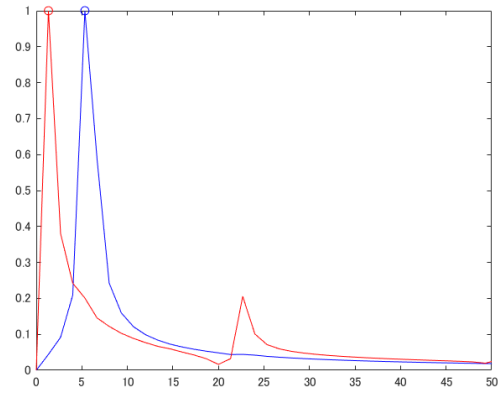
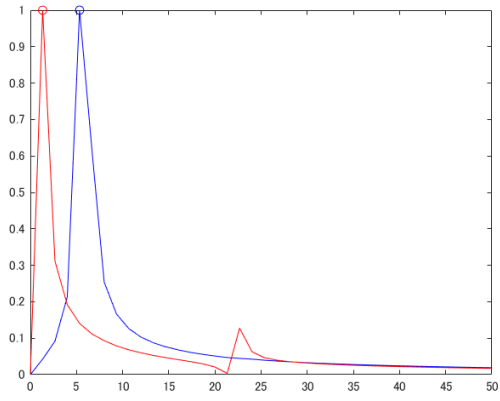


图 12

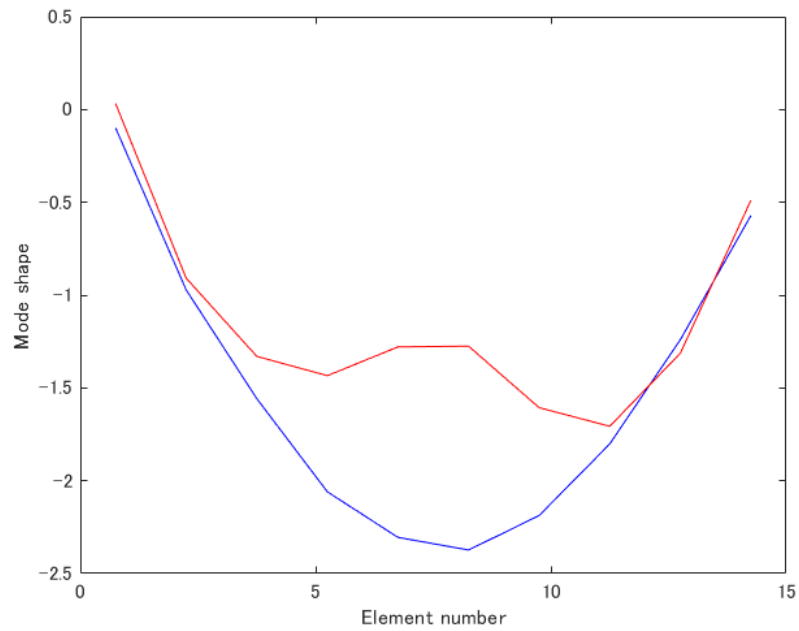


図 13

橋梁の 1、2 次固有振動数と比べ、図 10 でピーク値が対応する振動数がほぼ一致していると言える。同じように、段階 1 と段階 9 でずれが生じたのは、端の境界条件が主要な原因と考えられる。モード形状は 2 軸のほうよりかなり精度よくなったと見える。それに対し、推定値と有限要素法の値で MAC を計算すると、0.9401 となる。ただし、2 次モード形状は相似と言えない。

セグメントの数を減らしたらモード形状の滑らかさが影響されるが、理論的に、セグメント長さが増えれば各段階のデータ数が増え、それに従い FDD 法の精度も向上すると思われる。ここで車両軸間距離に対応するセグメント長さを変え、シミュレーションの最適なセグメント数を検討する。

セグメント数 6、5 の場合、モード形状は図 12 となり、MAC 値はそれぞれ 1 次で 0.9976、2 次で 0.9683 と 1 次で 0.9157、2 次で 0.8256 となる。MAC 値比較すると、セグメントの最適長さが 2.5m、数が 6 となる。

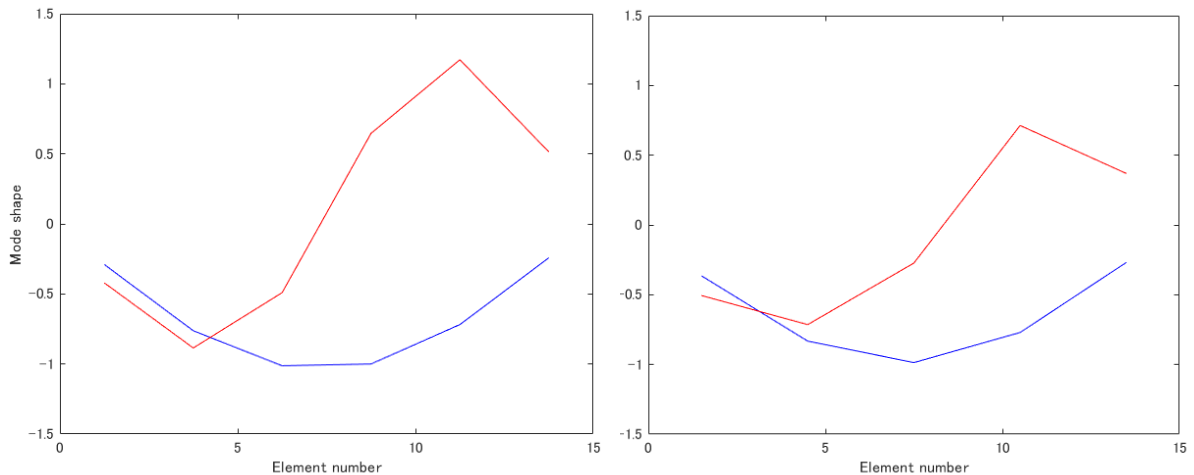


図 14

### 3.2.4 損傷時凹凸なし

健全状態を持つ橋梁に対し、STFDD 法の実現可能性を検討したが、次は損傷状態について討論する。ただし、損傷としては、橋梁の 100 個の要素の中で、ある要素の断面 2 次モーメント EI を比率的に減らすこととする。また、橋梁パラメータの変動により、固有振動数は新たに計算する必要がある。そのため、ここで橋梁のモード形状は新たな固有振動数で推定するのではなく、全振動数に対しモード形状をそれぞれ推定する。それらのモード形と有限要素法のモード形状の MAC 値を計算し、一番高い値に対応するモード形状は橋梁モード形状と見なし、そしてその振動数と新たに計算された固有振動数と比較し検討する。

まず、凹凸を考慮しなく、番号 20、40、60、80 の要素の EI を 10%、50% で減らし、モード形状を推定した。結果はそれぞれ図 13,14 で示す。MAC 値と推定された固有振動数は表 3-3、表 3-4 でまとめる。

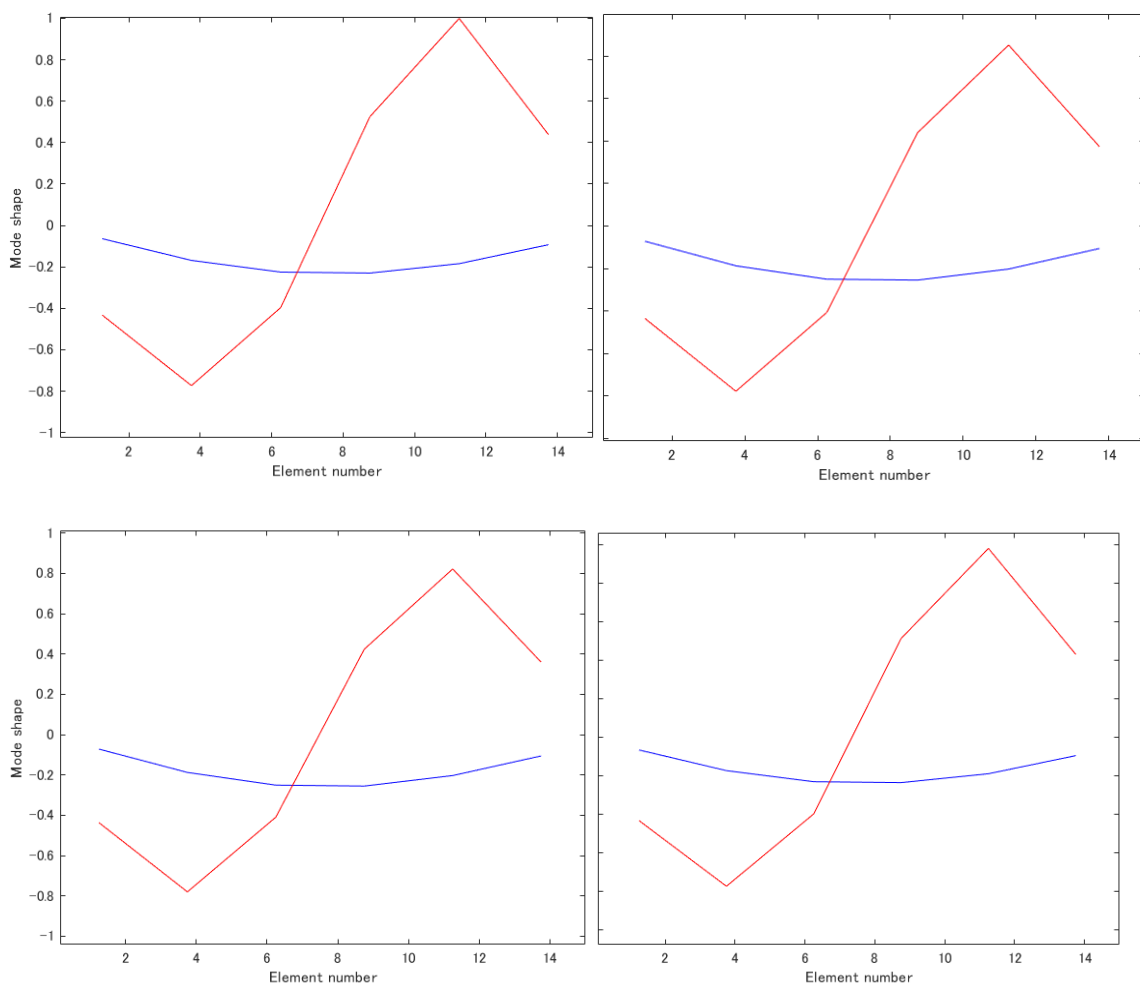


図 15

表 3-3 凹凸ない状態で 0.1 損傷に対応する MAC 値

Position	20/100	40/100	60/100	80/100
MAC of model 1	0.9994	0.9992	0.9992	0.9994
Frequency of model 1	5.3333	5.3333	5.3333	5.3333
MAC of model 2	0.9546	0.9690	0.9702	0.9571

Frequency of model 2	22.6666	22.6666	22.6666	22.6666
----------------------	---------	---------	---------	---------

図 13 から見ると、この条件で損傷がモード形状に与える影響は微小だと考えられる。

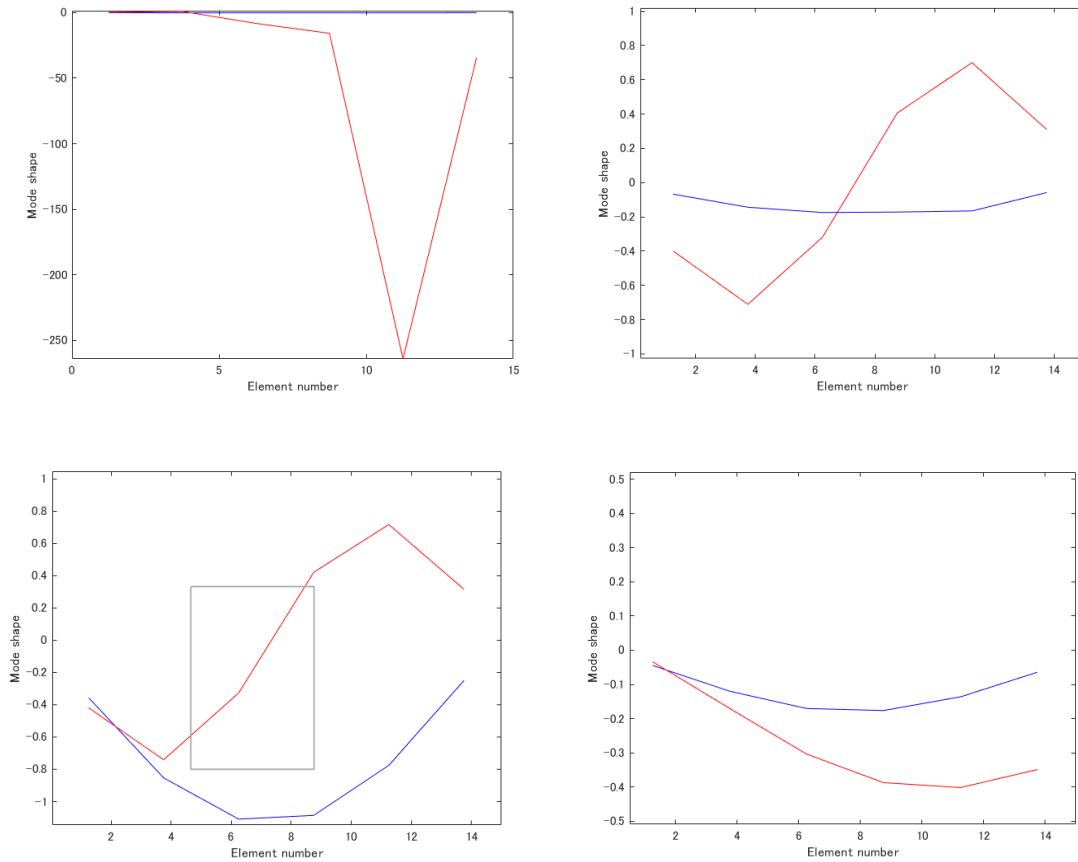


図 16

表 3-4 凹凸ない状態で 0.5 損傷に対応する MAC 値

Position	20/100	40/100	60/100	80/100
MAC of model 1	0.9999	0.9884	0.9875	0.9999
Frequency of model 1		5.3333	5.3333	
MAC of model 2	0.3626	0.9587	0.9570	0.0969
Frequency of model 2		22.6666	22.6666	

図 13 と表 3-4 から見ると、損傷が両端に寄るほど、2 モード形状に与える影響が大きくなる。

### 3.2.5 損傷時凹凸あり

また、凹凸を考慮しながら、番号 20、40、60、80 の要素の EI に同じ操作を行い、結果はそれぞれ図 15、16 で示す。MAC 値と推定された固有振動数は表 3-5、表 3-6 でまとめる。

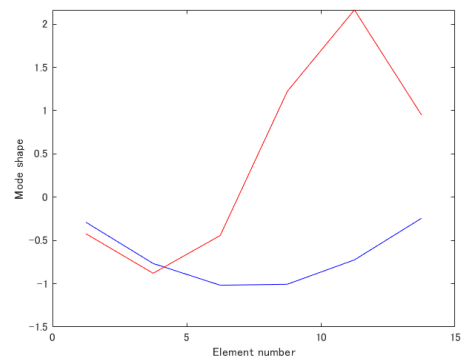
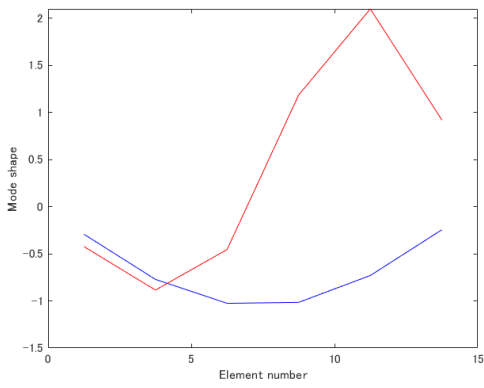
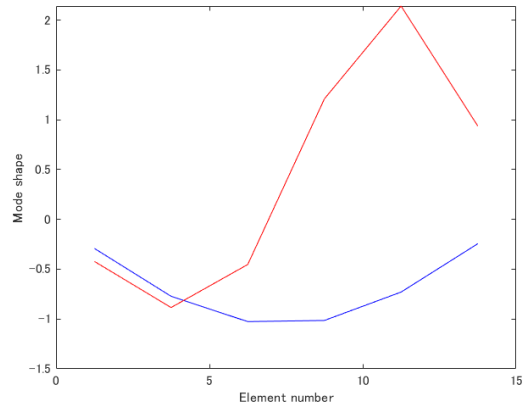
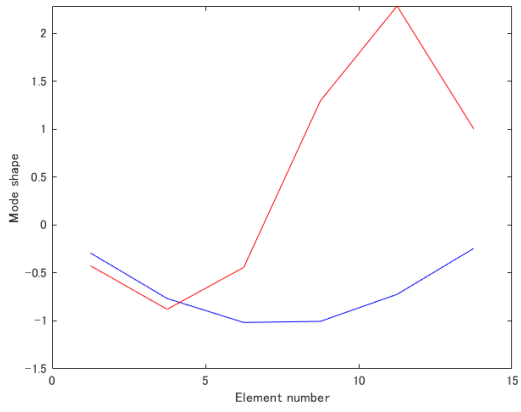


图 17

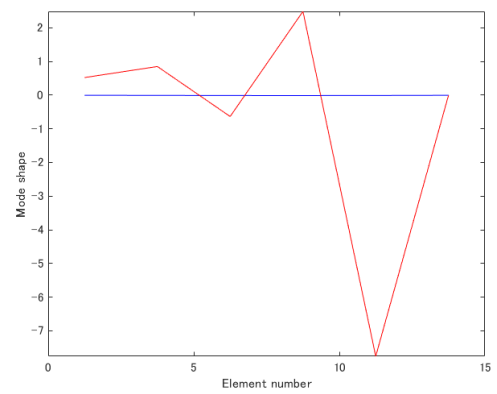
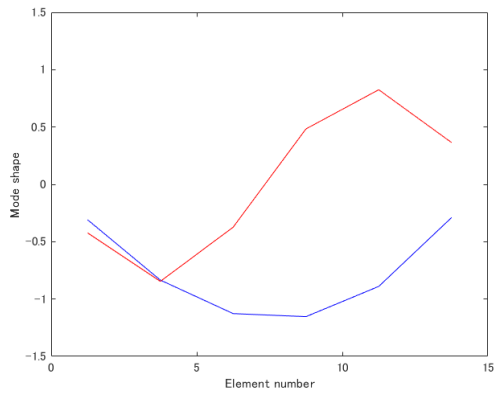
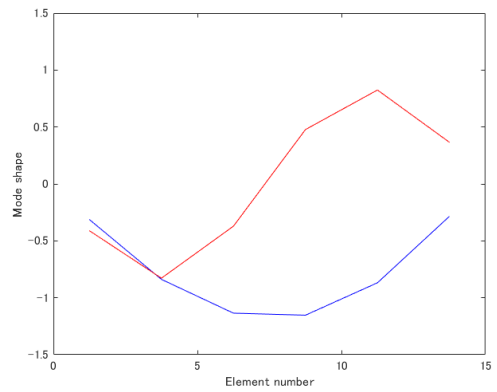
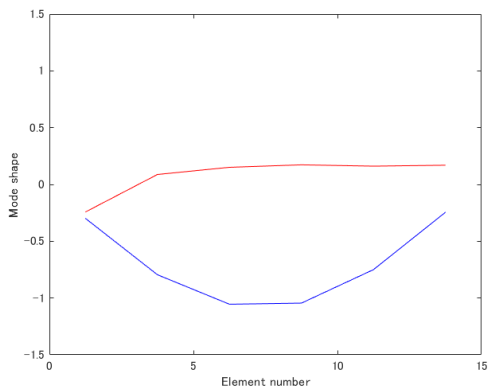


图 18



表 3-5 凹凸ある状態で 0.1 損傷に対応する MAC 値

Position	20/100	40/100	60/100	80/100
MAC of model 1	0.9910	0.9910	0.9910	0.9910
Frequency of model 1	5.3333	5.3333	5.3333	5.3333
MAC of model 2	0.7924	0.8112	0.8165	0.8068
Frequency of model 2	22.6666	22.6666	22.6666	22.6666

表 3-6 凹凸ある状態で 0.5 損傷に対応する MAC 値

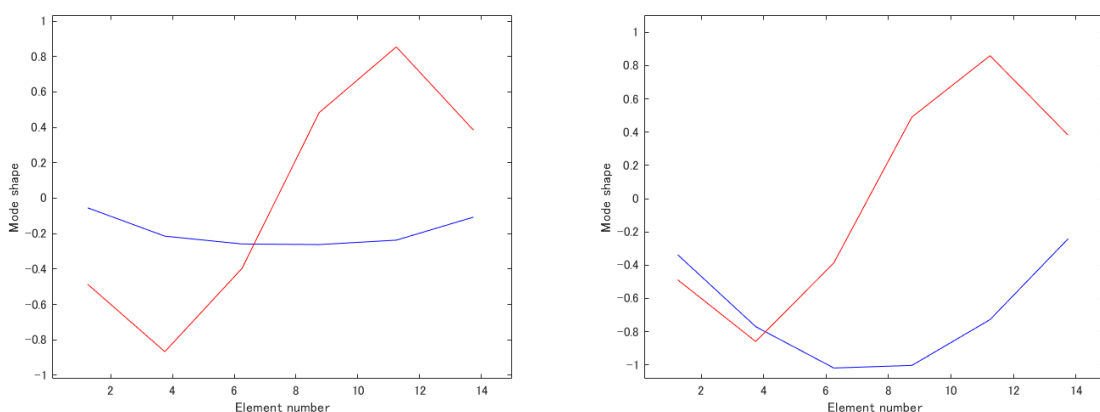
Position	20/100	40/100	60/100	80/100
MAC of model 1	0.9905	0.9942	0.9949	0.9945
Frequency of model 1	5.3333	5.3333	5.3333	5.3333
MAC of model 2	0.1419	0.9610	0.9598	0.2596
Frequency of model 2		22.6666	22.6666	

図 15 と表 3-5 の結果から見ると、軽度な損傷では 1 次モード形状がほぼ変わらないが、2 次モードに少量な変化をもたらし、相似度を評価する MAC 値も 20%程度減少した。ただし、損傷位置が変わったとしても、変化量があまり変わらないのである。

また、図 16 と表 3-6 の結果からみると、重度な損傷では 1 次モード形状と 1 次 MAC 値に軽微な影響を与えるが、2 次モード形状へ与える影響は凹凸ない場合と同じく、両端に寄るほどかなり大きくなる。

### 3.2.6 車両重さによるモード形状の変化

最後に、車両の重さを 0.2、0.5、2、5 に変化し、番号 20、40 の要素の EI を 0.1 の損傷を行い、結果は図 17(20 番)、18(40 番)で示す。MAC 値と推定された固有振動数は表 3-6(20 番)、表 3-7(40 番)でまとめる。



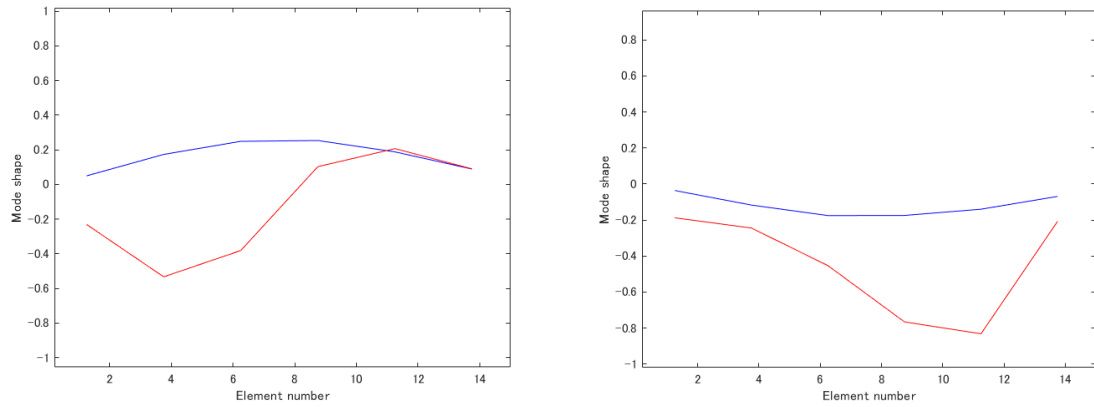


図 19

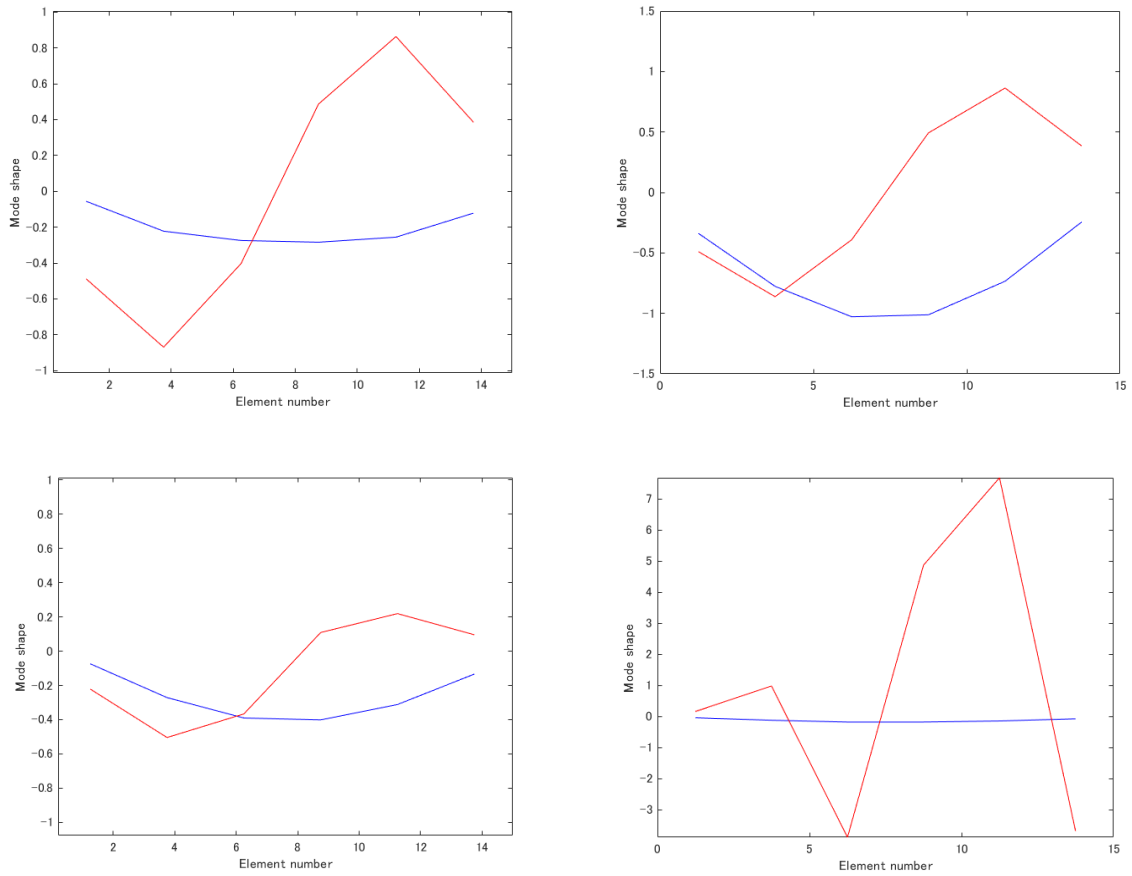


図 20

表 3-7 凹凸ある状態で 0.1 損傷に対応する 20 番要素の MAC 値

Magnification	0.2	0.5	2	5
MAC of model 1	0.9944	0.9893	0.9984	0.9986
Frequency of model 1	5.3333	5.3333		
MAC of model 2	0.9626	0.9601	0.8005	0.0805
Frequency of model 2	22.6666	22.6666		

表 3-8 凹凸ある状態で0.1 損傷に対応する 40 番要素の MAC 値

Magnification	0.2	0.5	2	5
MAC of model 1	0.9945	0.9894	0.9980	0.9986
Frequency of model 1	5.3333	5.3333	5.3333	5.3333
MAC of model 2	0.9629	0.9605	0.8250	0.1830
Frequency of model 2		22.6666		

結果からみると、車両の重量が増えれば、推定された 2 モード形状が損傷による変化が大きくなるが、ある限界を超えると、結果の精度が減るので、その重量の限界はどのように決めるのか、それについて検討する必要がある。

### 3.3 結果と考察

結果として、橋梁損傷が橋梁の 1 次モード形状も影響するが、主に橋梁 2 次モード形状に変化をもたらす。また、橋梁の損傷程度が大きくなるほど、そして両端に寄るほど、2 次モード形状の変化が大きくなる。加振機の機能を有する車両は、理論的に重量が大きくなれば、結果がより良い精度で得られるが、実際にはその限界があり、そしてその限界の決め方について検討する必要がある。

## 第4章 まとめ

本研究は、Short Time Frequency Domain Decomposition(STFD)法を用い、橋梁を渡る移動中の車両に搭載したセンサーから信号を処理し、橋梁のモード形状を出すことより橋梁損傷を検知する可能性を検討した。比較的に良いモード形状を推定するために、橋梁パラメータについて討論した。また、橋梁損傷の程度、位置、および実験車両の重量がモード形状に与える影響について検討した。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、指導教員を担当してくださいました松島亘志教授に深く感謝いたします。また、本研究を進めるにあたり、ゼミ等で、ご指導いただきました山本亨輔先生に心より感謝いたします。亀田敏弘教授にはゼミなどでご指導をいただきまして、深く感謝いたします。研究活動が続ける上で、様々な助言を頂いた高橋悠太氏と山本研究室の皆様、および地盤研究室の皆様、家族に感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] Y.B. Yang, C.W. Lin, J.D. Yau  
Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle  
J Sound Vib, 272 (2004), pp. 471-493
- [2] Y.B. Yang, C.W. Lin  
Vehicle-bridge interaction dynamics and potential applications  
J Sound Vib, 284 (2005), pp. 205-226
- [3] C.W. Lin, Y.B. Yang  
Use of a passing vehicle to scan the fundamental bridge frequencies: an experimental verification  
Eng Struct, 27 (2005), pp. 1865-1878
- [4] J.Q. Bu, S.S. Law, X.Q. Zhu  
Innovative bridge condition assessment from dynamic response of a passing vehicle  
J Eng Mech-ASCE, 132 (2006), pp. 1372-1379
- [5] Y.B. Yang, K.C. Chang  
Extraction of bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle enhanced by the EMD technique  
J Sound Vib, 322 (2009), pp. 718-739
- [6] K.C. Chang, F.B. Wu, Y.B. Yang  
Effect of road surface roughness on indirect approach for measuring bridge frequencies from a passing vehicle  
Interact Multisc Mech, 3 (2010), pp. 299-308
- [7] P.J. McGetrick, A. Gonzalez, E.J. O'Brien  
Theoretical investigation of the use of a moving vehicle to identify bridge dynamic parameters  
Insight, 51 (2009), pp. 433-438
- [8] Kim CW, Iseamoto R, Toshinami T, Kawatani M, McGetrick P, O'Brien EJ.  
Experimental investigation of drive-by bridge inspection. 5th international conference on structural health monitoring of intelligent infrastructure (SHMII-5). Cancun, Mexico; 2011.
- [9] Y.B. Yang, Y.C. Li, K.C. Chang  
Using two connected vehicles to measure the frequencies of bridges with rough surface: a theoretical study  
Acta Mech, 223 (2012), pp. 1851-1861
- [10] A. Gonzalez, E.J. O'Brien, P.J. McGetrick  
Identification of damping in a bridge using a moving instrumented vehicle  
J Sound Vib, 331 (2012), pp. 4115-4131
- [11] Y.B. Yang, K.C. Chang, Y.C. Li  
Filtering techniques for extracting bridge frequencies from a test vehicle moving over the bridge  
Eng Struct, 48 (2013), pp. 353-362
- [12] Y.B. Yang, W.F. Chen, H.W. Yu, C.S. Chan  
Experimental study of a hand-drawn cart for measuring the bridge frequencies  
Eng Struct, 57 (2013), pp. 222-231

- [13] J. Keenahan, E.J. OBrien, P.J. McGetrick, A. Gonzalez The use of a dynamic truck-trailer drive-by system to monitor bridge damping  
Struct Health Monit, 13 (2014), pp. 143-157
- [14] X.Q. Zhu, S.S. Law Wavelet-based crack identification of bridge beam from operational deflection time history  
Int J Solids Struct, 43 (2006), pp. 2299-2317
- [15] A.K. Pandey, M. Biswas, M.M. Samman Damage detection from changes in curvature mode shapes  
J Sound Vib, 145 (1991), pp. 321-332
- [16] V. Arora, S.P. Singh, T.K. Kundra Damped model updating using complex updating parameters  
J Sound Vib, 320 (2009), pp. 438-451
- [17] Brincker R, Zhang LM, Anderson P. Modal identification from ambient response using frequency domain decomposition. In: Proceedings of the 18th IMAC. San Antonio, TX, USA; 2000.
- [18] A.Malekjafarian E.J.Obrien  
Identification of bridge mode shapes using Short Time Frequency Domain Decomposition of the responses measured in a passing vehicle  
Engineering Structures Volume 81, 15 December 2014, Pages 386-397
- [19] 長江 信顕, 渡瀬 正泰, 玉木 利裕  
相互相関関数を用いた実稼動モード解析  
構造工学論文集 Vol.57A, pp.232-241, 2011
- [20] Rune Brincker<sup>1</sup>, Lingmi Zhang<sup>2</sup> and Palle Andersen  
Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition  
Smart Materials and Structures, Volume 10, Number 3
- [21] 向志海尧 张戴晓玮 陆秋海  
Tap-scanning method for detecting structural damages  
CN Application CN101561379A