

トラス橋の部材破断が SSMA 分析結果に 及ぼす影響の数値的検討

Numerical Examination about the effect of truss member breakage on SSMA

石川 幹生

Mikio Ishikawa

(指導教員 山本 亨輔)

Abstract—VRA (Vehicle Response Analysis) method, by which a bridge health can be evaluated, has been proposed. SSMA (Spatial Singular Mode Angle) is one of the proposed indices of VRA and indicates a bridge mode shape, which can be estimated only by using vehicle vibrations. SSMA rarely shows the correct bridge mode shape, but it has the high sensitivity to bridge damage. However, the previous studies have carried out only simple numerical simulations based on FEM. In this study, numerical approach is applied to a 3D truss bridge and full-sized car model. The results correspond well to the experiment results obtained in the previous studies.

1 はじめに

現在日本には長さ 2m 以上の橋梁がおおよそ 70 万橋存在している。その中には日本の経済成長期に建設された橋梁が多数存在しており、建設から 50 年が経過した橋梁の割合は平成 25 年の時点では全体の 18% であるが、平成 35 年には 43% まで増加すると見込まれている^[1]。経年により劣化する橋梁は今後ますます増加することが予想されるため、橋梁の維持管理は以前にも増して重要となってきた。しかし、都道府県や市区町村が管理する橋梁では、点検が十分に行われているとは言い難いのが現状である。市区町村が管理する橋梁の点検方法は、遠望目視などによる点検が 8 割近くを占め、全部材近接目視による点検は 2 割程度に留まっている^[1]。これには、多大なコストがかかること、橋梁点検を行える技術者が不足していることなどが理由として挙げられる。橋梁保全業務に携わる土木技術者が全くいないという市区町村も一定の割合で存在している^[1]。

すべての橋梁を 1 つ 1 つ点検するためには多くの費用や技術者が必要になり、財政上の困難が予想される。限られたリソースを合理的に配分するためには、詳細点検を行う前に全橋梁をおおまかにスクリーニングする必要がある。

橋梁スクリーニング手法については、これまで車両応答分析による研究^{[2][11]}が進められている。この手法は、走行車両に加速度センサを搭載し、橋梁通過中の車両振動から橋梁振動を推定し、その特性の変化から橋梁の健全性を判定するものである。既往の研究^{[11][12]}

において橋梁振動のモード形状に着目し、推定された橋梁振動を用いて算出したモード形状を指標として橋梁の健全性を判定する手法が提案されている。ただし、本手法は路面凹凸の影響を除去するために複数の車両が等間隔等速度で走行する必要があり、実用化に限界があった。そこで、手法の適用性を高めるため、車両振動を橋梁振動と見なし、直接、橋梁振動モードを推定する手法も提案している^[13]。この手法では、車体そのものの振動や路面凹凸が推定した橋梁振動に誤差として含まれる^[14]ため、橋梁振動モードを正確に推定することが出来ない。しかし、推定モード形状が損傷前後で感度良く変化することから、橋梁スクリーニング指標としての適用性が認められる。

車両振動から橋梁振動モードを直接推定するには、車両の移動による影響などを補正するプロセスが必要となる。空間補正後の車両振動をモード分解し、得られるモード行列は、橋梁のモード形状を推定したものとなる。これを本研究では特に空間特異モードと呼称する。空間特異モードは、橋梁のモード形状でも車両のモード形状でもなく、解析的にもその意義に不明確な点が多い。しかし、既往の研究^{[15][16]}では、実験的にその有効性が確認されている。たとえば、実際の鋼製トラス橋における斜材破断や模型桁橋における一部剛性低下により橋梁損傷を模擬した上、車両を走行させて空間特異モードを求める実験^[1]が行われており、いずれの実験でも橋梁の健全時と損傷時で有意な差が見られた。一方、数値計算においては 1 次元有限要素梁モデルを用いたシミュレーションが行われている^[17]で、損傷による橋梁の動的挙動の変化が十分に再現できていない。そのため、空間特異モードの橋

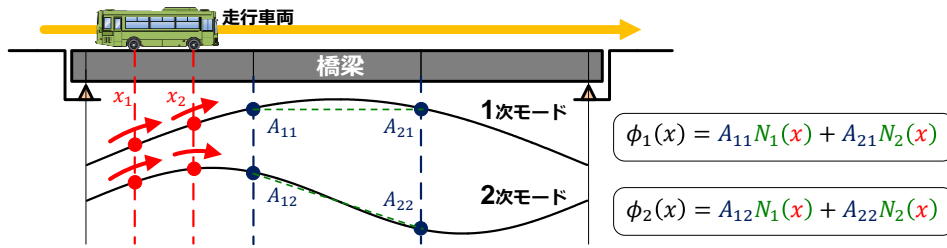


図1 移動計測点から観測されるモード形状

梁損傷に対する反応メカニズムを解明するに至っていない。

より詳細なモデルに基づいた計算コードを開発し、様々なケースについて空間特異モードの挙動を確認することが、本手法の有効性を明らかにする上で重要である。本研究では、橋梁として3次元有限要素モデルを用いたトラス橋を対象とし、車両は剛体バネ振動系でモデル化した四輪車を用いて、車両振動を再現する。空間特異モードは、その変化により損傷を検知するタイプの指標であることから、車両の走行速度や路面凹凸などのパラメータをばらつかせることで、繰り返し走行を再現し、トラス橋の斜材破断に対する空間特異モードの統計的変化を明らかにする。

なお、空間特異モードの次数と離散点数は、車上の計測点数に一致する。車体振動は、前輪および後輪から入力される強制変位によって定まるため独立な振動成分は2つとなる。車体にはサスペンションがあり、サスペンションより上をバネ上、下をバネ下と呼ぶ。本研究では、前軸バネ下および後軸バネ下の2点計測振動データを用いるものとする。したがって、このとき、空間特異モードを表す行列は、独立変数を2つ含んでいる。この2変数の比を単位円上にプロットし、その位相角をSSMA (Spatial Singular Mode Angle : 空間特異モード角) と呼び、損傷評価指標とする。

2 SSMA を用いた車両応答分析 理論と既往の研究について

2.1 SSMA の計算方法

一般に、モード解析理論で想定される橋梁振動の計測値は、固定点で得られるものである。一方、車両振動から推定される橋梁振動は、車両走行に伴って計測位置が時間変化する移動計測点での計測値である。そこで、本研究では基底関数を導入し、移動計測点 $x = \tilde{x}(t)$ での計測値 $\tilde{y}(t)$ から、仮想した固定計測点 $x = \hat{x}_1, \hat{x}_2$ での推定値 $\tilde{y}(t_s)$ を求める。図1に内挿の概念図を示す。

k 次のモード形状関数を $\phi_k(x)$ 、基準座標を $q_k(t)$ とおくと、橋梁変位振動は(1)式のように求められる。

$$y(x, t) = \sum_{k=1}^n \phi_k(x) q_k(t) \quad (1)$$

ここで、 n は考慮する最大モード次数である。(1)式より、移動計測点 $x = \tilde{x}(t)$ における橋梁変位は

$$\tilde{y}(t) = \sum_{k=1}^n \phi_k(\tilde{x}(t)) q_k(t) \quad (2)$$

と表される。車上計測点数を $n = 2$ としたとき、等しい数の固定計測点 $x = \hat{x}_1, \hat{x}_2$ における k 次のモード形状関数を \hat{A}_{jk} として以下のように表す。

$$\hat{A}_{jk} = \phi_k(\hat{x}_j) \quad (j = 1, 2) \quad (3)$$

つづいて、 $\phi_k(x)$ を内挿によって離散化する。内挿とは、基底関数により連続関数を補間することである。基底関数 $N_j(x)$ ($j = 1, 2, \dots, n$) を用いて、 k 次のモード形状関数 $\phi_k(x)$ は近似的に次式のように表すことができる。

$$\phi_k(x) = \sum_{j=1}^n a_{jk} N_j(x) \quad (4)$$

ここで、基底関数が、 $N_j(\hat{x}_j) = 1$ 、かつ、 $N_j(\hat{x}_i) = 0$ (ただし、 $i \neq j$) となる性質を示すとき、 $a_{jk} = \hat{A}_{jk}$ である。本研究では、基底関数としてラグランジュ関数を用いた。(5)式にラグランジュ関数 $N_j(x)$ を示す。

$$N_j(x) = \left(\frac{n+1}{L} \right)^{n-1} \prod_{\substack{l=1 \\ (l \neq j)}}^n \frac{x - \hat{x}_l}{j - l} \quad (5)$$

ここで、 L は橋長である。固定計測点は、橋梁内のどの点においても仮想できるが、モード形状の直交性を保証しやすいため、橋梁を等間隔に分割する点とする。このとき、近似したモード形状 $\phi_k(x)$ を行列で表すと、

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \phi_1(\tilde{x}_1(t)) & \phi_2(\tilde{x}_1(t)) \\ \phi_1(\tilde{x}_2(t)) & \phi_2(\tilde{x}_2(t)) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} N_1(\tilde{x}_1(t)) & N_2(\tilde{x}_1(t)) \\ N_1(\tilde{x}_2(t)) & N_2(\tilde{x}_2(t)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{A}_{11} & \hat{A}_{12} \\ \hat{A}_{21} & \hat{A}_{22} \end{bmatrix} \quad (6) \end{aligned}$$

と表すことができる。移動計測点の座標を代入して得られる基底行列を $\mathbf{N}(t)$ 、モード形状行列を $\tilde{\Phi}(t)$ とすると、次式が得られる。

$$\tilde{\Phi}(t) = \mathbf{N}(t)\hat{\mathbf{A}} \quad (7)$$

ここで、(2)式に(7)式を代入すると

$$\tilde{\mathbf{y}}(t) = \mathbf{N}(t)\hat{\mathbf{A}}\mathbf{q}(t) \quad (8)$$

となる。車両後輪が x_1 を通過してから ($t = t_1$)、前輪が x_2 を通過するまで ($t = t_m$) を内挿の定義領域とする。(8)式の両辺に $\mathbf{N}^{-1}(t)$ をかけると、移動計測点での計測値から固定計測点での推定値を求めることができる。

$$\mathbf{N}^{-1}(t)\tilde{\mathbf{y}}(t) = \hat{\mathbf{A}}\mathbf{q}(t) \quad (9)$$

次に、(9)式で求まる固定計測点での推定値を特異値分解し、モード形状を推定する。固定計測点での推定値を m 列並べた行列を $\mathbf{M}(\in \mathbf{K}^{n \times m})$ とすると

$$\mathbf{M} = [\mathbf{N}^{-1}(t_1)\tilde{\mathbf{y}}(t_1) \quad \dots \quad \mathbf{N}^{-1}(t_m)\tilde{\mathbf{y}}(t_m)] \quad (11)$$

$$\mathbf{M} = [\hat{\mathbf{A}}\mathbf{q}(t_1) \quad \dots \quad \hat{\mathbf{A}}\mathbf{q}(t_m)] \quad (12)$$

$$\mathbf{M} = \hat{\mathbf{A}}\mathbf{Q} \quad (13)$$

となる。特異値分解は $n \times m$ 行列に対して適用可能であるから、(11)式の \mathbf{M} に対して特異値分解を適用し、

$$\mathbf{M} = \mathbf{U}\Sigma\mathbf{V}^T \quad (14)$$

と分解できる。ゼロ行列となる部分を省略すると、 $\mathbf{U}(\in \mathbf{R}^{n \times n})$ 、 $\mathbf{V}(\in \mathbf{R}^{n \times m})$ は直交行列(ただし、 $\mathbf{V}^T\mathbf{V} = \mathbf{I}$ 、 \mathbf{I} : 単位行列)、 $\Sigma(\in \mathbf{R}^{n \times n})$ は特異値を対角成分にもつ対角行列である。また、 Σ の対角成分を大きなものから順に並べると、 \mathbf{U} 、 Σ および \mathbf{V} は一意に求められる。

ここで、(14)式のようにデータ行列 \mathbf{M} に特異値分解を適用したとき、モード形状を正確に推定するためには、橋梁の各次モード形状の直交性と、各次モードの基準座標の無相関性が同時に満たされる必要がある。モード形状は定義により直交性を有するが、橋梁振動は強制加振力(交通荷重)によって励起されているため、必ずしも無相関性を示すとは限らない。そのため、特異値分解によって得られた推定モード形状 \mathbf{U} は橋梁のモード形状を正確に推定できないと考えられる。

一方、特異値分解で得られる推定基準座標 \mathbf{V}^T は基準座標に最も近い無相関な行列に限られる。ここで、基準座標が損傷により局所的に変化した場合であっても、 \mathbf{V}^T は無相関であるという制約から変化しないと予想できる。これにより生じる基準座標の推定誤差は、モード形状推定値 \mathbf{U} に影響を与えないと考えられる。

したがって、損傷前後でモード形状の推定精度が変化すると考えられている^[16]。ゆえに、SSMA は高感度の損傷指標となる。

ここまでは、移動計測点での測定値として車両位置における橋梁振動を考えてきたが、本研究では車両振動を用いることとする。そのため、モード形状の推定精度は低下するが、損傷指標をモード形状そのものではなく、推定値としているため、このような置き換え操作も可能である。ただし、車両振動には路面凹凸の影響が含まれる。路面凹凸は空間周波数特性をもっているため、走行速度が変化すると路面凹凸の影響も変化する。したがって、検討においては走行速度ばらつきによる路面凹凸の影響変化も考慮する必要がある。

2.2 SSMA の有効性を示す事例

既往の研究において、SSMAの有効性は実験的に見出された。ここでは、既往の研究で示されたSSMAの有効性について述べる。

図2に鋼製トラス橋における車両走行実験^[15]の様子を示す。図3、図4に示すように橋梁および車両に加速度センサ、光電センサを設置し、車両と橋梁の振動加速度および走行位置を計測した。鋼製トラス橋のパン長は約65mで、形式はゲルバートラス橋となっている。車両重量は約25トンで基準走行速度は時速10km、20km、40kmとし、可能な限り一定の速度で走行した。車両が走行する車道と反対側のトラス部材のうち、ひとつの斜材を切断し、橋梁損傷を模擬している。詳細は参考文献を参照されたい。

計測された車両振動加速度データと車両走行位置データを用いて、SSMAを求めたものを図5に示す。なお、SSMAは半径1の円周上にプロットされている。青丸が斜材切断前(Intact)、赤丸が斜材切断後(Damaged)のSSMAである。図5より、走行速度が同一であれば、損傷前後でSSMAの変化を捉えることができる。

図5では、走行速度を変化させると、SSMA値も変化している。本来、モード形状の推定値であるSSMAは車両走行速度とは無関係となるはずである。よって、SSMAは橋梁モード形状を正確に推定できているわけではないことが分かる。しかし、VRAを実施する目的は、橋梁のモード形状を正確に推定することではなく、損傷有無の評価であるから、損傷感度が高いSSMAは損傷検知指標として有用であるといえる。ただし、本実験の各走行ケースにおいて、繰り返し回数は3回であり、統計的に十分であるとはいえない。

その他、SSMAに関する研究としては、中釜による模型実験^[16]などが挙げられる。この検討では、車両模型の走行速度を少しずつ変化させながら、SSMAを繰り返し計算し、ヒストグラムを作成している。橋梁模



図2 移動計測点から観測されるモード形状

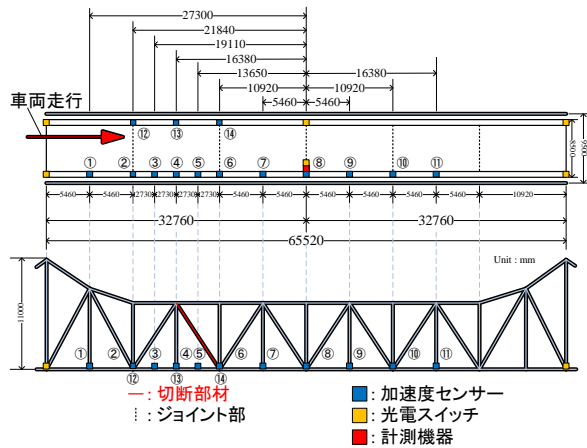


図3 橋梁のセンサ配置と切断部材

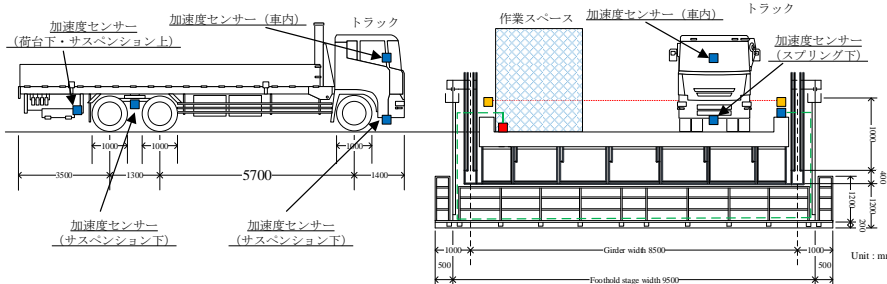


図4 車上センサ配置

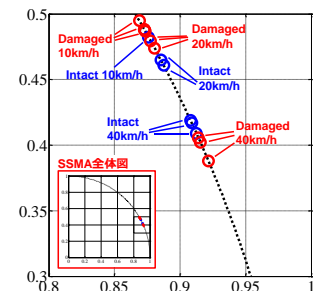


図5 SSMA 分析結果

型の剛性を変化させた時、ヒストグラムにどのような変化が生じるかを確認し、SSMAの有効性を統計的に明らかにした。また、中釜はSSMAの損傷感度が高くなる理由として、特異値分解が仮定している基準座標の無相関性が影響している可能性を指摘している。式(14)に示すように、橋梁振動を特異値分解するとき、モード形状 $\hat{\mathbf{A}}$ の推定値 \mathbf{U} と基準座標 $\mathbf{q}(t)$ の推定値 $\mathbf{S}\mathbf{V}^T$ にそれぞれ直交性、無相関性が仮定されている。しかし、基準座標 $\mathbf{q}(t)$ は必ずしも無相関性を示すわけではないため、推定誤差が生じる。この誤差は橋梁損傷により変化するが、基準座標 $\mathbf{q}(t)$ の推定値 $\mathbf{S}\mathbf{V}^T$ は変化せず、モード形状推定値 \mathbf{U} の推定精度が影響を受ける可能性がある。これが、SSMAが橋梁損傷に高い感度を示すメカニズムと考えられる。ただし、模型実験は桁橋に対して行われたもので、損傷も部分的に剛性を低下させることで模擬されており、図2に示した鋼製トラス橋での実験とは特性が異なる。しかし、両者の結果はともにSSMAの有効性を示すものである。

また、1次元有限要素梁モデルと Half-Car モデルを用いた簡易な数値シミュレーションによる検討も行われている¹⁷⁾が、SSMAの定性的挙動は、実験結果とよく一致している。しかし、数値計算の結果はSSMAの有効性については疑問の残るものであり、またSSMAが橋梁損傷に感度良く反応するメカニズムを解明したとは言い難く、より詳細な検討が必要である。

また、車両振動を橋梁振動と見なすことから、路面凹凸や車体の影響などの外的影響も受けやすく、これらの影響をどのように考慮するのかなど、課題も残されている。

3 数値計算コードの作成と数値解の妥当性検証

3.1 モデルの設定

本研究では、トラス部材の破断がSSMAに及ぼす影響を検討するため、VBI (Vehicle-Bridge Interaction : 車両-橋梁相互作用) システムモデルを用いた数値計算プログラムを作成した。ここで、車両には3次元剛体バネモデルを、橋梁にはビーム要素を組み合わせた3次元有限要素モデルを用いた。路面凹凸は車両のパラメータや走行速度を変化させながら、車両と橋梁の振動加速度を求めた。車両振動と走行位置からSSMAを推定するプログラムコードを作成した。

橋梁モデルの作成にあたっては、ビーム要素の組み合わせにより、3次元トラス橋モデルを作成した。質量マトリクス \mathbf{M} は、質量集中マトリクスを採用した。減衰マトリクス \mathbf{C} については、レイリー減衰を用いた。

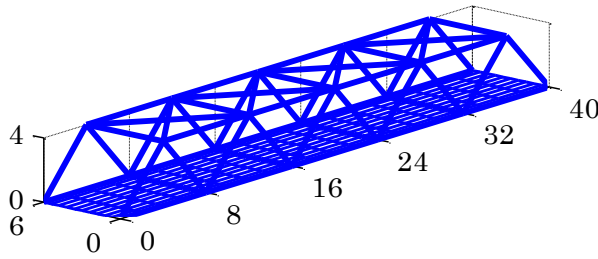


図6 トラス橋モデル(単位:m)

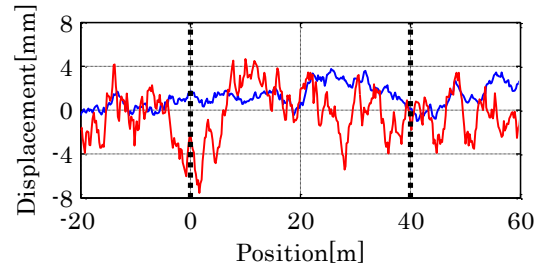


図7 路面凹凸

表1 橋梁モデルのパラメータ

全体寸法	長さ	40[m]	床板	要素分割数	縦方向	20
	幅	6[m]			横方向	10
トラス部材	密度	7800[kg/m ³]		密度		2400[kg/m ³]
	断面積	0.02[m ²]		高さ		0.4[m]
	ヤング率	200 × 10 ⁹ [Pa]		ヤング率		25 × 10 ⁹ [Pa]
	せん断弾性係数	78 × 10 ⁹ [Pa]		ねじり剛性		1.1 × 10 ⁹ [Pa · m]
	断面二次モーメント	1.0 × 10 ⁻⁴ [m ⁴]		縦方向断面二次モーメント		0.03[m ⁴]
	断面二次極モーメント	1.0 × 10 ⁻⁶ [m ⁴]		横方向断面二次モーメント		0.2[m ⁴]

$$\mathbf{C} = \mathbf{C}_M \mathbf{M} + \mathbf{C}_K \mathbf{K} \quad (15)$$

ここで、 \mathbf{K} は剛性マトリクスである。また、本研究では、 $\mathbf{C}_M = 0.01$ 、 $\mathbf{C}_K = 0.1$ とおいた。

橋梁はトラス部材と床板から成るものとし、それぞれ別の要素モデルを用いた。桁はスパン長40m、幅6mで、トラスの高さは4mである。トラス橋モデルの外観を図6に示す。また、車両の走行位置には図7に示すような路面凹凸を加える。各部材のパラメータは表1に示す。なお、床板は等方性材料であるものとし、剛性や質量などはそれぞれ縦方向、横方向の節点数で割ったものを1要素あたりのパラメータとした。路面凹凸は実データを基にモンテカルロシミュレーションにより生成したものをを用いた。作成した路面凹凸は標準的な路面と粗い路面の2通り作成した。車両走行位置における路面凹凸は図7の通りであり、青が標準路面、赤が粗い路面を表す。

車両は四輪車とし、剛体である車体と各車輪の間がそれぞれサスペンションによるバネと減衰器で繋がっており、車輪と路面の間もまたタイヤによる擬似的なバネと減衰器で繋がっているものとした。各車輪の高さ方向の座標を $z_{u1} \sim z_{u4}$ 、各車輪の直上の車体の高さを $z_{s1} \sim z_{s4}$ とする。 $z_{u1} \sim z_{u4}$ 、 $z_{s1} \sim z_{s4}$ はそれぞれ車両が静止状態にあるときの高さを0とする。バネ定数や減衰定数、質量、寸法などは図8および表2の通りである。パラメータの設定の際には既往の研究^[4]で使用された値を参考に設定した。

方程式については、車体重心の高さ方向の運動方程式、車体のロールおよびピッチ方向の回転の運動方程式、各車輪に対する高さ方向の運動方程式、そして、車体が剛体であるという仮定より、 $z_{s1} \sim z_{s4}$ が同一平面上に存在するという条件を用いて方程式を立てた。

$$\mathbf{M}_v \ddot{\mathbf{z}} + \mathbf{C}_v \dot{\mathbf{z}} + \mathbf{K}_v \mathbf{z} = \mathbf{f} \quad (16)$$

\mathbf{f} に関して、 F_s は車体重心に作用する鉛直方向の外力を、 T_{sr} 、 T_{sp} は車体の重心周りに作用するロールおよびピッチ方向のモーメントを、 $F_{u1} \sim F_{u4}$ はそれぞれの車輪に作用する鉛直方向の外力を表す。

車両から橋梁への荷重は、車輪 $i(i=1 \sim 4)$ について、上向きを正、重力加速度 $g=9.8\text{m/s}^2$ として、

$$P_i = \left(\frac{L_2 W_2}{L W} m_s + m_{ui} \right) g + c_i \dot{z}_{ui} + k_i z_{ui} \quad (17)$$

と表した。

車両の走行位置については、車両橋梁の左端から0.6m、2.4mの位置を車輪が通過するものとした。

車両から橋梁にかかる荷重は、常に節点上に作用するわけではないため、エルミート補間を用いた等価節点力で表現した。また、車輪と路面は常に接しているものと仮定する。加速度計は車輪位置に取り付けるものとし、右側の車輪と左側の車輪でそれぞれ別々にSSMAを計算した。

車両および橋梁の振動を求める計算手順として、以下の手順で繰り返し計算を行った。

1. 路面上で車両を走行させ、車両の振動を算

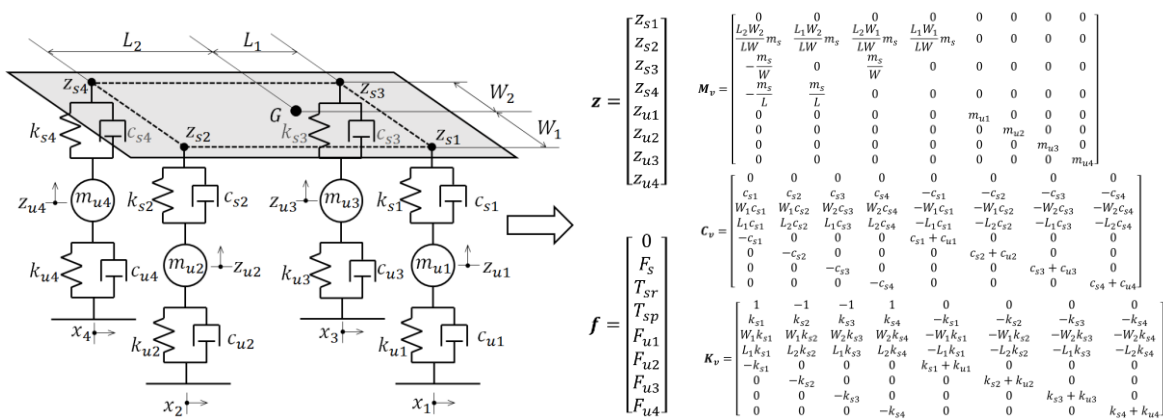
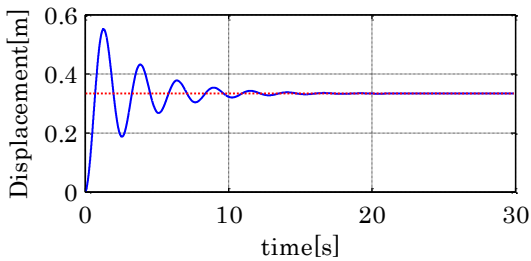


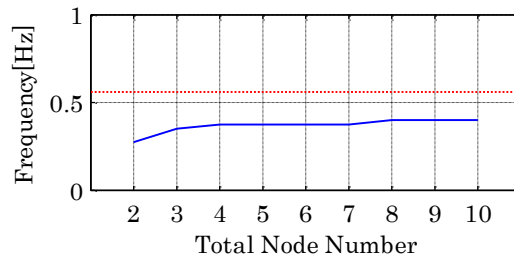
図8 車両モデルとマトリクス

表2 車両モデルのパラメータ

車体	質量	m_s	18000[kg]
	慣性モーメント(ピッチ方向)	I_p	65000[kg・m ²]
	慣性モーメント(ロール方向)	I_r	15000[kg・m ²]
車輪上	減衰定数	$c_{s1}, c_{s2}, c_{s3}, c_{s4}$	10000[kg/s]
	バネ定数	$k_{s1}, k_{s2}, k_{s3}, k_{s4}$	1000000[kg/s ²]
車輪	質量	$m_{u1}, m_{u2}, m_{u3}, m_{u4}$	1100[kg]
車輪下	減衰定数	$c_{u1}, c_{u2}, c_{u3}, c_{u4}$	30000[kg/s]
	バネ定数	$k_{u1}, k_{u2}, k_{u3}, k_{u4}$	3500000[kg/s ²]
寸法	長さ	L_1, L_2	1.875[m]
	幅	W_1, W_2	0.9[m]



(a)片持ち梁端部の振動



(b)片持ち梁固有周波数

図9 片持ち梁における計算結果

出する

2. 車両の振動により橋梁にかかる荷重を計算し、それを外力として橋梁振動を算出する
3. 橋梁の振動を路面の凹凸と合わせ車両へかかる力を計算し、車両振動を求める
4. 手順2,3を計算結果が収束するまで繰り返す

3.2 妥当性の検証

作成したプログラムコードの妥当性を検証するために、片持ち梁について数値計算を行った。結果を図9に示す。図9(a)は片持ち梁の端部に一定の荷重を加えたときの端部の変位を示している。グラフの青線は計算結果を、赤の点線は収束値の理論解を表す。結果より、作成したプログラムは振動の収束値には高い精度

を示すことがわかる。図9(b)は片持ち梁の固有振動数を示す。グラフの青線は計算結果を赤の点線は理論解を表している。ただし、この理論解は減衰項が存在しない場合の理論解である。結果から、節点数が増えると理論解に漸近するが一致してはいないことがわかる。これは、数値計算では減衰項を設定していることによるものであると考えられる。

3.3 計算結果

次に、作成した橋梁モデル上で車両モデルを走行させ、車両振動の振動と橋梁健全時のSSMAを計算した。路面凹凸はいずれも標準の路面を使用した。結果を図10および図11に示す。図10は車輪1の加速度を表し、上のグラフが橋梁健全時の、下のグラフが部材を1つ

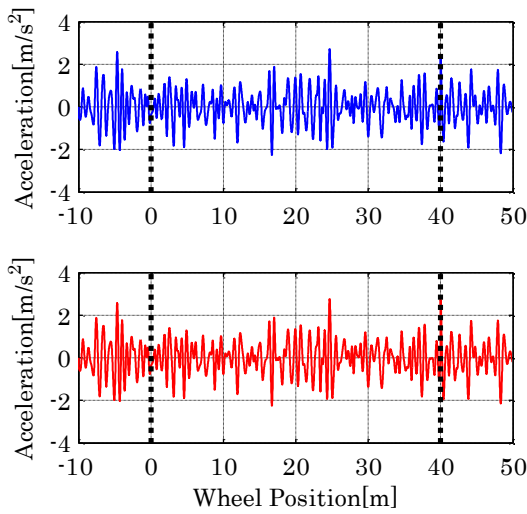


図10 車輪加速度

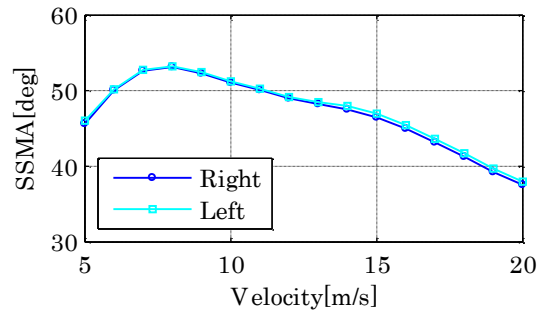


図11 橋梁健全時の車両速度とSSMA

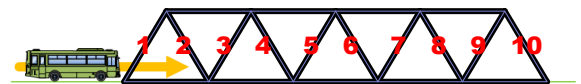
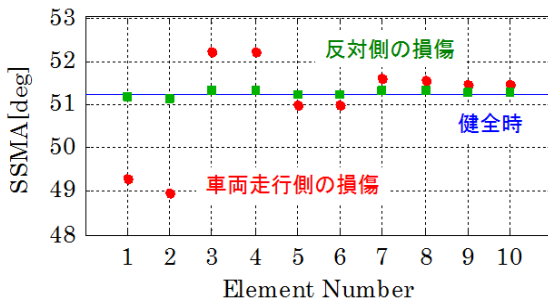
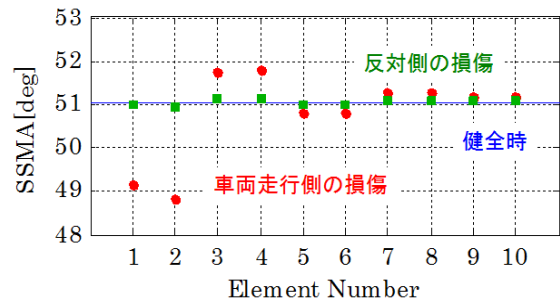


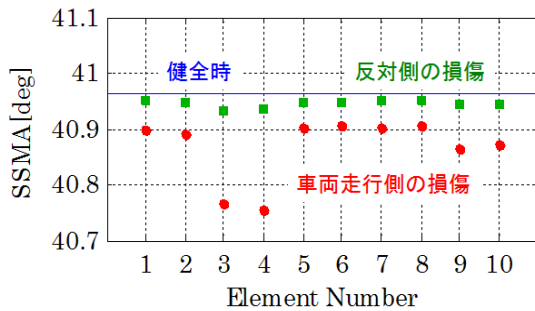
図12 橋梁部材番号



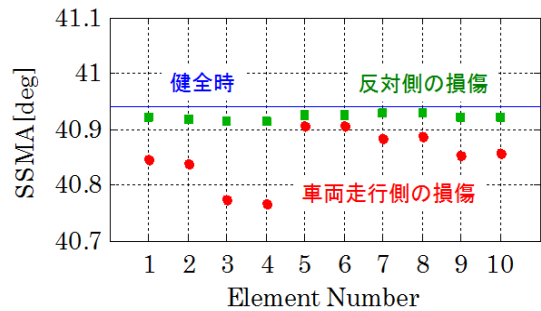
(L-R1) 左車輪 標準路面



(R-R1) 右車輪 標準路面



(L-R2) 左車輪 粗い路面



(R-R2) 右車輪 粗い路面

図13 部材破断箇所とSSMA

破断させた場合の加速度を示している。破断させた部材は、車両走行側、すなわち車両進行方向に対して左側の図12の3番の部材である。2つのグラフから、橋梁健全時と損傷時で加速度の波形や振幅に大きな違いは見られないことがわかる。また、図11は橋梁健全時においてSSMAを右側の車輪と左側の車輪で別々に計算したものを表している。グラフから、左右の車輪でSSMAはおおよそ一致していることがわかる。

4 トラス橋の斜材破断検知を目的としたSSMAの有効性

まず、トラス部材の破断によるSSMAへの影響を調べるために、トラス部材を1つずつ破断させて計算を行い、それぞれの試行に対してSSMAを求め、橋梁健全時のSSMAと比較した。部材の番号は図12の通りであり、橋梁の左右両側についてそれぞれ10本の部材を1つずつ破断させた。車両の走行速度は10m/sとした。その結果を図13に示す。結果から、SSMAは車両走行側の部材の損傷に対して感度が高いことや、破断させ

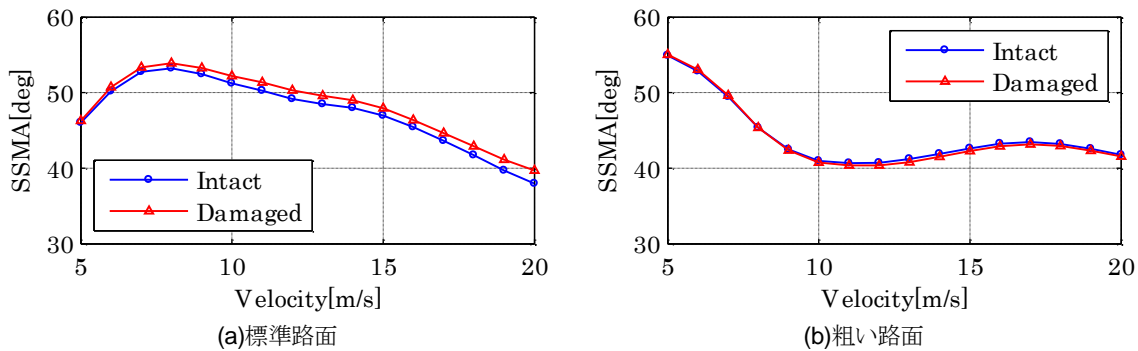


図 14 車両速度と SSMA

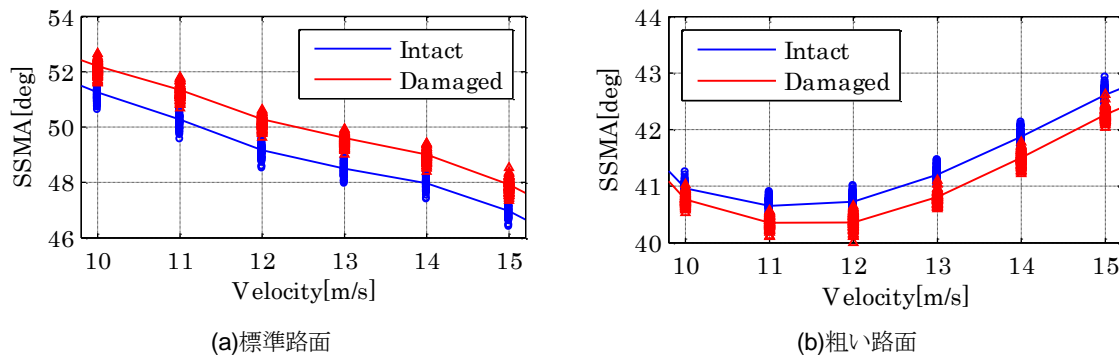


図 15 車両速度と SSMA(ノイズ付加)

る部材によって健全時のSSMAとの大小関係は異なっていること、トラス構造の対になっている部材(1と2、3と4など)をそれぞれ破断させたときSSMAはよく似た変化を示すことがわかる。また、標準の路面と粗い路面を比較することで、同じ部材を破断させても路面の状態によってSSMAの挙動は異なること、路面が滑らかな方が橋梁健全時と損傷時でSSMAの変化量が大きいことがわかる。また、右車輪と左車輪でSSMAの挙動の傾向はほぼ一致していることがわかる。車両走行側の部材損傷に対してSSMAの感度が高いことに関しては、車両に近い部材の損傷が車両の振動に対してより大きく影響するためと考えられる。

次に、車両の速度が変化した場合のSSMAの挙動を調べるために、車両の速度を5~20m/sの間で1m/sずつ変化させ、橋梁健全時と損傷時でSSMAを比較した。SSMAの計算に使用する加速度データは左車輪のものを用いた。破断させる部材には、車両走行側の部材の3番を使用した。その結果を図14に示す。結果から、速度が変化したときのSSMAの変化の仕方は路面の状態に依存すること、車両速度が高い方が橋梁健全時と損傷時でSSMAの差が大きくなりやすいことがわかる。これは、車両速度が速い方がより強く橋梁振動を励起するためと考えられる。

ただし、橋梁健全時と損傷時でSSMAが変化したとしても、外乱の影響によってSSMAが大きく変化して

しまう場合は、橋梁の健全性判定の指標としては有効でない。そのため、加速度にノイズが発生した場合を想定し、その状況下でSSMAを用いて橋梁の健全性を判定できるか調べた。具体的には、乱数を生成し、これをノイズとして車輪の加速度に加算し、作成した加速度を用いてSSMAを計算した。加算する乱数の大きさは $\pm 0.2\text{m/s}^2$ 以内とした。これは、車輪の加速度の最大値が図10からわかる通り 2m/s^2 であり、ノイズの大きさを計測する加速度の最大値の10%以内と見積もったためである。試行回数は1つのケースについて100回ずつとし、車両速度10~15m/sについて1m/sごとに計算した。破断させる部材には、車両走行側の部材の3番を使用した。その結果を図15に示す。グラフ中の実線はノイズなしの値を、マーカーはノイズを与えた場合の値を表している。図15の結果のうち、車両速度10m/sにおけるSSMAの確率分布を表すヒストグラムを作成した。その結果を図16に示す。上が健全時を、下が損傷時を示す。グラフ中の点線はノイズを含まないときの値である。結果から、3番の部材の破断に対しては、今回加えたノイズの影響を加味してもSSMAにより破断を検知可能であることがわかる。また、標準路面の方がより明確に健全時と損傷時で異なるSSMAの値を示すことがわかる。

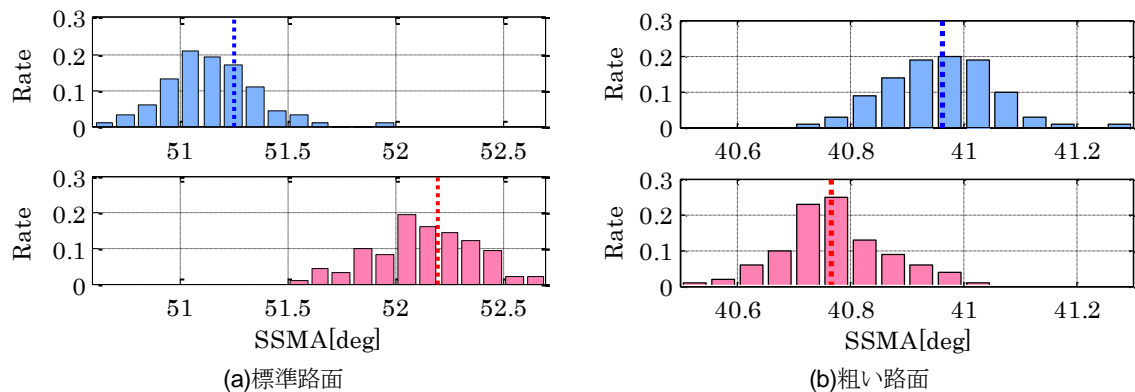


図 16 SSMA の確率分布

5 まとめ

本研究では、トラス橋においてトラス部材を破断させたときのSSMAの変化について数値計算を行い、橋梁の健全度指標としての有効性について検証した。以下に本研究で得られた知見を記す。

- (1) 橋梁の損傷位置によってSSMAの感度は変化し、車両走行側のトラス部材の破断に対して感度が高いことがわかった。
- (2) 車両速度が速く、また路面が滑らかな条件下で橋梁健全時と損傷時のSSMAの変化が顕著になることがわかった。
- (3) 車両振動にノイズを与えたところ、特定の条件下ではノイズを考慮してもSSMAによる損傷検知は可能であることがわかった。

本研究では、これまで1次元的空间でのみ行われていた車両応答分析の数値計算を3次元に拡張した。その結果、SSMAが損傷検知に有効であるための条件を既往の研究に比べより詳細に調査することができた。しかし、SSMAは車両速度や路面凹凸などにより大きく変化することや、損傷位置によってはSSMAの感度が低いことにより、未だ限定的な環境でしか使用することができず、実用化までにはいくつかの課題がある。SSMAでの損傷検知の精度を上げるためには、路面凹凸や車両速度などによる影響を低減または補正する必要がある。また、本研究ではSSMAの理論的メカニズムの解明には至らなかった。しかし、既往の1次元モデルにおける数値計算に比べ損傷に対して高い感度を示したことから、SSMAが損傷に反応する仕組みには損傷による左右の非対称性や橋梁のねじり関係している可能性があると考えられる。これら

の手がかりをもとにSSMAの損傷検知メカニズムを検討していくことが、今後の課題の1つとなる。

参考文献

- [1] 国土交通省：道路の老朽化対策，老朽化対策の取組み，2014.
- [2] Yang, Y.-B., Lin, C. W. and Yau, J. D. : Extracting bridge frequency from the dynamic response of a passing vehicle, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.272, pp.471-493, 2004.
- [3] Yang, Y. B. and Lin, C. W. : Measuring the bridge frequencies from the response of a passing vehicle, *Environmental Vibrations*, Takemiya ed., 2005.
- [4] Ling, C. W. and Yang, Y. B. : Use of a passing vehicle to scan the fundamental bridge frequencies: An experimental verification, *Engineering Structures*, Vol.27, pp.1865-1878, 2005.
- [5] Y.B. Yang, K.C. Chang: Extracting the bridge frequencies indirectly from a passing vehicle : Parametric study, *Engineering Structure*, Vol.31, pp.2448-2459, 2009
- [6] Y.B. Yang, K.C. Chang: Extraction of bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle enhanced by the EMD technique, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.322, pp.718-739, 2009
- [7] Y.B. Yang, K.C. Chang, Y.C. Li : Filtering techniques for extracting bridge frequencies from a test vehicle moving over the bridge, *Engineering Structures*, Vol.48, pp.353-362, 2013
- [8] Toshinami, T., Kawatani, M. and Kim, C.W. : Feasibility investigation for identifying bridges fundamental frequencies from vehicle vibrations, *Bridge maintenance, safety, management and life-cycle optimization*, IABMAS 2010, pp.317-322, 2010.

- [9] Xiang, Z., Dai, X., Zhang, Y. and Lu, Q. : The Tap-Scan Damage Detection Method for Beam Structures, *Advances Interaction & Multiscale Mechanics*, pp.541-553, 2010.
- [10] 山本亨輔, 大島義信, 金哲佑, 杉浦邦征 : 車両応答データの特異値分解による橋梁損傷検知技術の提案と検討, *構造工学論文集*, Vol.59A, pp.320-331, 2013.
- [11] 山本亨輔, 大島義信, 杉浦邦征, 河野広隆 : 車両応答分析に基づく橋梁モード形状推定手法の開発, *土木学会論文集*, 土木学会論文集 A1, Vol.67, pp.242-257, 2011.
- [12] Kyosuke Yamamoto, Ryo Isemoto, Yoshinobu Oshima, Chul-Woo Kim and Kunitomo Sugiura: Modal Parameter Changes of a Steel Truss Bridge due to Member Fracture, the 24th KKCNN Symposium on Civil Eng., Hyogo, Japan, pp.185-188, 2011.
- [13] 山本亨輔, 大島義信, 金哲佑, 杉浦邦征 : 車両応答データの特異値分解による橋梁損傷検知技術の提案と検討, *構造工学論文集*, Vol.59A, pp.320-331, 2013.
- [14] Kyosuke Yamamoto and Yuta Nakagama: Errors on bridge vibration data measured by a passing vehicle, the 26th KKHTCNN Symposium on Civil Eng., Singapore, 2013.
- [15] 山本亨輔, 伊勢本遼, 大島義信, 金哲佑, 杉浦邦征 : 鋼トラス橋の部材破断が橋梁および走行車両の加速度応答に及ぼす影響, *構造工学論文集*, Vol.58A, pp.180-193, 2012.
- [16] 中釜祐太 : 模型桁実験による車両応答を用いたモード形状推定法の桁損傷検知への適用性に関する検討, *筑波大学理工学群工学システム学類卒業論文*, 2014.
- [17] Kyosuke Yamamoto, Mikio Ishikawa: Relationship between SSMA and vehicle run speed, the 27th KKHTCNN Symposium on Civil Eng., Shanghai, China, 2014.

謝辞

日頃の研究から卒業論文の製作に至るまで、非常に丁寧なご指導いただきました山本先生に深謝いたします。また、ゼミで貴重なご指摘、アドバイスをいただきました山田先生と松島先生、様々な相談に乗っていただいた高橋先輩と浅川さん、そして大学の研究生生活を支えてくれた私の家族に心から御礼を申し上げます。