MEMS 利用による交通振動計測の可能性検証 Feasibility study for the analysis of traffic-induced vibration measured by MEMS

浅川 一樹 Kazuki ASAKAWA (指導教員 山本 亨輔)

Abstract –Vibration-based SHM (Structure Health Monitoring) for a bridge girder is focused in this study. To improve the labor effectiveness on SHM for bridges, both of the application of vibration analysis methods to the traffic-induced vibration and the adoption of MEMS sensors are technical issues. In this study, FDD (Frequency Domain Decomposition) method is applied to the measured data on a small bridge by new MEMS sensors. The results shows the feasibility of this method, but several technical issues still remains.

1 はじめに

我が国では建設から50年以上経過した橋梁等の道 路構造物が一斉に老朽化を迎え始めており、いつ事故 が起きるか分からない状況である^[1]。実際に笹子トン ネル天井板落下事故のように部材の経年劣化を一因^[2] とした死亡事故も起きている。この状況を受けて、国 土交通省は、平成26年度から橋梁・トンネル等の道路 構造物の近接目視点検を5年に1回の頻度で行うこと^[3] を全道路管理者に求めることとした。

目視点検では、技術者の主観的判断や能力に依ると ころが多く、熟練技術者の育成が必要である。特に橋 梁点検は橋梁の下部に回り込む必要などから、安全対 策にも多大なコストを要する。財政問題を抱え、土木 技術者も不足する地方公共団体では5年に1回の点検 であっても重い負担となる^[5]。そのため目視点検に頼 ることなく、実測値に基づいて客観的かつ低コストに 橋梁の健全性を評価できる新しい基準が求められて いる。近年、様々な検査方法が提案されているが、橋 梁振動計測は構造物全体の健全性評価に有効である と期待されている。

一般的な橋梁振動計測は、橋梁に加速度センサを直 接取り付ける。健全性評価を行うためには、ある程度 の個数のセンサが必要となるため⁽⁴⁾、設置等に掛かる 労力、費用の低減が求められている。

このような中で、近年、技術的発展の著しいMEMS センサを用いた多点計測の可能性に注目が集まって いる。MEMSとはMicro Electro Mechanical Systemの略 であり、自律制御された小型のコンピュータを用いて、 センサを制御するシステムである。MEMSセンサは、 市販の部品を組み合わせることで、低コストに必要な 機能を実現することが出来る。また、バッテリなどを 用いて独立した電源供給システムを内蔵させること で、ケーブル敷設を不要とし、現場作業の省力化と安 全性の向上に貢献することが期待出来る。

橋梁構造全体の健全性評価は、構造同定手法により 実現される。加速度振動データに基づく場合は、健全 性評価指標として、固有振動数やモード形状、減衰な どの振動モード指標、平均や分散、歪度、尖度などの 統計指標、反共振周波数、周波数応答関数、ウェーブ レット係数^[4]17]などの利用が考えられる。固有振動数 は比較的容易に計測ができるが、損傷位置、程度等の 損傷評価には向いていない^[18]。一方、モード形状は空 間的な特性を把握でき、構造全体の状態を捉えるのに 向いている。しかし、その計測のためには、橋梁全体 に高精度のセンサを数多く設置する必要がある。本研 究では、特にモード形状に着目することとする。

対象橋梁として、中小スパン橋梁を考える。中小ス パン橋梁の多点計測に対して、従来型の有線センサを 用いることは、設置費用やセンサ費用の点で経済性が 低く、実用化に不利である。そこで、安価なMEMSセ ンサを採用し、現場への適用性を確保する。ただし、 MEMSセンサは有線式サーボ型加速度センサを用い た計測システムと比べると、精度やデータ処理能力で 劣る。そのため、自由振動や常時微動を計測しても、 環境外乱の影響が無視できず、分析が困難となる懸念 がある。一方、中小スパン橋梁は、トラックやバスな どの重量車により励起される交通振動の振幅が環境 外乱に比べて大きく、利用できる可能性が高い。

そこで、ここでは交通振動を対象とする分析手法の 採用を検討する。ただし、交通振動は過渡応答のため、

200911160 ASAKAWA - 2

分析する場合には実稼働モードに対応した手法を採 用する必要がある。また、車両が橋梁に及ぼす動的外 力を測定することが困難なことから、分析手法は、入 力未知システムに適用可能な同定手法でもある必要 がある。

このような条件を満たす分析手法にFDD(Frequency Domain Decomposition:周波数領域分解)法が挙げられ る。Brincker ら^[19]によって提案された FDD 法は、計測 データのクロスパワースペクトル行列を特異値分解 により対角化し、特異値スペクトルおよびモード形状 を推定する手法である。前提条件として、全周波数領 域で、各次モードの基準座標が同じ周波数成分を持た ないことを仮定している。入力が不明で出力が既知の 構造同定手法の一種であり、交通振動のような実稼働 モード解析に適用できるとされる。

本研究の目的は、交通振動計測におけるMEMSセン サを用いた振動計測とFDD法による振動分析の適用 性を検証することである。

2 FDD 法による交通振動分析の 可能性について

いま、構造物をN点で計測した計測結果から、その FRF(Frequency Response Function: 周波数応答関数) 行列 $\mathbf{H}(\omega) \in \mathbf{C}^{N \times N}$ を求めることを考える。周波数領域

(角振動数 ω [rad/s]) での各点の加振力 $F(\omega) \in \mathbb{C}^N$ 、および各点の振動応答 $Y(\omega) \in \mathbb{C}^N$ は、FRF 行列を用いて式(1)のような関係がある。

$$Y(\omega) = \mathbf{H}(\omega)F(\omega) \tag{1}$$

ここで、*F*(ω)およびY(ω)はともにN次ベクトルであ り、各要素が各点で計測される振動データに対応して いる。したがって、加振力*F*(ω)と振動応答Y(ω)が共に 得られているような場合には、両者の比を各周波数で 求めることで FRF 行列を求めることが出来る。

$$\mathbf{H}(\omega) = \begin{bmatrix} H_{11}(\omega) & \cdots & H_{1N}(\omega) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{N1}(\omega) & \cdots & H_{NN}(\omega) \end{bmatrix}$$
$$= \begin{bmatrix} \frac{Y_1(\omega)}{F_1(\omega)} & \cdots & \frac{Y_1(\omega)}{F_N(\omega)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{Y_N(\omega)}{F_1(\omega)} & \cdots & \frac{Y_N(\omega)}{F_N(\omega)} \end{bmatrix}$$
(2)

ここで、 H_{ij} はj番目の加振点に対するi番目の振動応答 との FRF であり、 $Y(\omega) = \{Y_1(\omega) \cdots Y_N(\omega)\}^T$ 、 $F(\omega) = \{F_1(\omega) \cdots F_N(\omega)\}^T$ である。また $\{ \}^T$ は転 置を表す。FRF が求まった場合、 $H(\omega)$ のいずれか1列 分または1行分の要素からFDD 法などの周波数領域 法を用いてモーダルパラメータの同定が可能である。 $H(\omega)$ を逆フーリエ変換し得られる IRF (Impulse Response Function、インパルス応答関数)行列について も、時間領域法を用いて同定できる。

交通振動計測においては、 $Y(\omega)$ が橋梁応答であり、 $F(\omega)$ は交通荷重に対応する。但し、交通荷重は未知で ある場合が一般的である。FDD 法のような $F(\omega)$ が未 知の場合の実稼働モード解析においては、周波数領域 で振動応答 $Y(\omega)$ の各要素間のクロスパワースペクト ル、または、時間領域(時刻t[s])で振動応答y(t)の各 要素間の相互相関関数を求めてモーダルパラメータ の同定を行う。以下では、クロスパワースペクトルか ら推定される FRF および相互相関関数から推定され る IRF をそれぞれ疑似 FRF、疑似 IRF と呼ぶことにす る。長江ら²³は極 - 留数モデルを用いて、疑似 FRF お よび疑似 IRF が FRF および IRF 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を示してい る。以下では、長江らの方法に従いモーダルパラメー タを推定する手法を示す。

FRF 行列**H**(*ω*)は極 - 留数モデルを用いて式(3)のように表わされる。

$$\mathbf{H}(\omega) = \sum_{r=1}^{N} \left(\frac{\mathbf{R}_{r}}{j\omega - \lambda_{r}} + \frac{\mathbf{R}_{r}^{*}}{j\omega - \lambda_{r}^{*}} \right)$$
(3)

ここで、jは虚数単位、 λ_r はr次モードの極、 $\mathbf{R}_r \in \mathbf{C}^{N \times N}$ はr次モードの留数行列である。()*は複素共役を表 す。また、r次モードの極 λ_r はr次モードの固有角振動 数 ω_r とr次モードの減衰比 h_r を用いて次式(4)のよう に表すことが出来る。

$$\lambda_r = -h_r \omega_r + j \sqrt{1 - h_r^2} \omega_r \tag{4}$$

今、r次モードのモード形状関数をN点の計測点に対応 する離散量で表すことを考える。すなわち、r次モー ドのモード形状を $\psi_r \in C^N$ とおく。この時、r次モード の留数行列 \mathbf{R}_r はモード形状 ψ_r を用いて次式(5)のよう に表すことができる。

$$\mathbf{R}_r = \boldsymbol{\psi}_r \boldsymbol{\psi}_r^{\mathrm{T}} \tag{5}$$

式(3)に式(5)を代入して式(6)を得る。

$$\mathbf{H}(\omega) = \sum_{r=1}^{N} \left(\frac{\boldsymbol{\psi}_{r} \boldsymbol{\psi}_{r}^{\mathrm{T}}}{j\omega - \lambda_{r}} + \frac{\boldsymbol{\psi}_{r}^{*} \boldsymbol{\psi}_{r}^{\mathrm{H}}}{j\omega - \lambda_{r}^{*}} \right)$$
(6)

ここで、{}^Hは複素共役転置(エルミート共役)を表 す。これより、FRF行列H(ω)はr次の固有モードに関 する情報を持つことが分かる。 次に、振動応答 $Y(\omega)$ のクロスパワースペクトル行列 $G_{VV}(\omega)$ を式(7)のように求める。

$$\mathbf{G}_{YY}(\omega) = \begin{bmatrix} G_{11}(\omega) & \cdots & G_{1N}(\omega) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{N1}(\omega) & \cdots & G_{NN}(\omega) \end{bmatrix}$$
$$= \begin{bmatrix} Y_1(\omega)Y_1^*(\omega) & \cdots & Y_1(\omega)Y_N^*(\omega) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_N(\omega)Y_1^*(\omega) & \cdots & Y_N(\omega)Y_N^*(\omega) \end{bmatrix}$$
$$= \mathbf{Y}(\omega)\mathbf{Y}^{\mathrm{H}}(\omega) \qquad (7)$$

ここで、式(1)を式(7)に代入すると、

$$\mathbf{G}_{YY}(\omega) = \mathbf{H}(\omega)\mathbf{F}(\omega)\mathbf{F}^{\mathrm{H}}(\omega)\mathbf{H}^{\mathrm{H}}(\omega) = \mathbf{H}(\omega)\mathbf{G}_{FF}(\omega)\mathbf{H}^{\mathrm{H}}(\omega)$$
(8)

である。ただし、 $G_{FF}(\omega)$ は加振力 $F(\omega)$ のクロスパワースペクトル行列である。

今、加振力 $F(\omega)$ が未知であるため、そのクロスパワ ースペクトル行列 $G_{FF}(\omega)$ も未知である。そこで、各点 での加振力が同じ周波数成分持たず、パワー平均が周 波数と加振点に依らず一定であるような特性を仮定 する。この仮定より、式(9)が成り立つ。

$$\mathbf{G}_{FF}(\omega) = \begin{bmatrix} f^2 & \cdots & 0\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ 0 & \cdots & f^2 \end{bmatrix} = f^2 \mathbf{I}$$
(9)

ここで、fは加振力のパワー平均であり、各加振点で一様である。また、Iは単位行列である。式(9)に示したような条件を交通荷重が必ずしも満たすとは限らない。式(9)を式(6)と比較しやすくするため、 ψ_r に比例するモード形状 $\phi_r \in \mathbb{C}^N$ を次式(10)のように定義する。

$$\boldsymbol{\phi}_r = \sqrt{\frac{\boldsymbol{\psi}_r^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\psi}_r^*}{2h_r \omega_r}} \boldsymbol{\psi}_r \tag{10}$$

ここで、式(6)、式(9)および式(10)を式(8)に代入すると 以下のように式(11)が導かれる。

$$\mathbf{G}_{\boldsymbol{Y}\boldsymbol{Y}}(\omega) = f^{2}\mathbf{H}(\omega)\mathbf{H}^{\mathrm{H}}(\omega)$$
$$= f^{2}\sum_{r=1}^{N} \left(\frac{\boldsymbol{\phi}_{r}\boldsymbol{\phi}_{r}^{\mathrm{H}}}{j\omega-\lambda_{r}} + \frac{\boldsymbol{\phi}_{r}^{*}\boldsymbol{\phi}_{r}^{\mathrm{T}}}{j\omega-\lambda_{r}^{*}} + \frac{\boldsymbol{\phi}_{r}\boldsymbol{\phi}_{r}^{\mathrm{H}}}{-j\omega-\lambda_{r}} + \frac{\boldsymbol{\phi}_{r}^{*}\boldsymbol{\phi}_{r}^{\mathrm{T}}}{-j\omega-\lambda_{r}^{*}}\right)$$
(11)

式(11)の第1項および第2項は正の遅延、第3項およ び第4項は負の遅延である。クロスパワースペクトル 行列**Gyy(**ω)の正の遅延成分**G**⁺_Y(ω)は式(12)となる。

$$\mathbf{G}_{\mathbf{Y}\mathbf{Y}}^{+}(\omega) = f^{2} \sum_{r=1}^{N} \left(\frac{\boldsymbol{\phi}_{r} \boldsymbol{\phi}_{r}^{\mathrm{H}}}{j\omega - \lambda_{r}} + \frac{\boldsymbol{\phi}_{r}^{*} \boldsymbol{\phi}_{r}^{\mathrm{T}}}{j\omega - \lambda_{r}^{*}} \right) \quad (12)$$

200911160 ASAKAWA - 3

これは $G_{YY}(\omega)$ の逆フーリエ変換である相互相関関数 行列 $g_{YY}(t)$ について正の遅延 (t > 0)を取り出しフー リエ変換したものである。式(12)は式(6)同様に全ての モーダルパラメータに関する情報を持つ疑似 FRF で ある。ここで、先に述べたように式(9)に示すような加 振条件を交通荷重が満たせるように、データの平均化 を行う。本研究では、対象となる全データに対して、 Nデータずつ 25%オーバーラップさせながらデータを M個取り出し、それぞれのデータに対し $G_{YY}^{+}(\omega)$ を求め た後、それらを平均化して疑似 FRF を求めた。

Brincker らは FDD 法により強制加振時の構造物の モード形状が精度良く推定できることを示した¹⁰。こ れは式(12)で得られた疑似 FRF 行列 $G_{YY}^{+}(\omega)$ を特異値 分解することで特異値スペクトルと推定モード形状 を得る手法である。本研究では、Brincker らの方法に 従い、平均化疑似 FRF 行列 $G_{YY}^{+}(\omega)$ の特異値分解を式 (13)のように行う。

$$\mathbf{G}_{YY}^{+}(\omega_{i}) = \mathbf{U}_{i}\mathbf{S}_{i}^{+}\mathbf{U}_{i}^{\mathrm{H}}$$
(13)

ここで、 $U_i \in \mathbb{R}^{N \times N}$ はユニタリ行列であり、各列がモード形状ベクトル ϕ_r の推定値 $\hat{\phi}_r$ から成る。また、 S_i^+ は特異値を対角成分に持つ対角行列である。今、対角成分は大きさに従い降順に並んでいるものとする。疑似 FRF 行列 $G_{YY}^+(\omega_i)$ は、各周波数で定義されている。よって、各周波数 ω_i に対して特異値スペクトル密度 S_i^+ が求められる。得られた特異値スペクトル密度を縦軸に、そのときの周波数を横軸にプロットしていく。このようにして得られたパワースペクトル密度の曲線に対し、小さいほうからr番目に出現するピークを、r 次モードの推定固有角振動数 ω_r (固有振動数 $f_r = \omega_r/2\pi$)とする。また、 ϕ_r の推定値として適当なベクトルは、 S_r^+ が十分に大きい時なので、これに対応するベクトルは U_r の第1列目となる。

$$\widehat{\boldsymbol{\phi}}_r = \boldsymbol{u}_{r1} \tag{14}$$

ここで、 $\mathbf{U}_r = \{ u_{r1} \cdots u_{rN} \}$ とした。以上より、r次の固有振動数 f_r およびモード形状 $\hat{\boldsymbol{\phi}}_r$ が得られる。

FDD 法を適用すれば、交通荷重作用下での橋梁振動 特性が損傷変化によりどのように変化するか確認で きる。式(9)に示すような外力の白色性の仮定は満たさ れておらず、平均化による補正はあるものの十分とも 考えにくいため、結果の信頼性には限界がある。今回 は特異値スペクトルにピーク検知法を適用し、機械的 に全モード形状を求めたが、強く励起されているモー ドとそうでないモードで推定結果の信頼性には差が ある点に注意を要する。



表1 VBI システムモデルのパラメータ

| (a) 車両パフメータ | | | (b) 橋梁バフメータ | | | | |
|-------------|-----------|----------------|--------------------------------|-----------------------|--------|----|------------------------------|
| Sprung- | Mass | m_s | 18,000[kg] | Span Length | | L | 30.0[m] |
| _ | Stiffness | k _s | $1.0 \times 10^{6} [kg/s^{2}]$ | Flexural Stiffness | | EI | 1.56 × 10 ¹⁰ [Nm] |
| _ | Damping | C _S | 1.0×10^{4} [kg/s] | Mass per unit length | | ρΑ | 3,000[kg/m] |
| | Inertia | I_P | 64958[kg m ²] | Reyleigh coefficients | | α | 0.000 |
| | Distance | l | 1.875[m] | | | β | 0.000 |
| Unsprung- | Mass | m_u | 1,100[kg] | Elements | Туре | | 1-D Beam Element |
| | Stiffness | k _u | $3.5 \times 10^{6} [kg/s^{2}]$ | | Number | | 300 |
| | Damping | c _u | 3.0×10^{4} [kg/s] | | Length | | 0.0100[m] |
| Run speed | | 12 | 10.0[m/s] | | - | | |

| 表 2 | VBIシステ | ムの基本モー | ド特性 |
|-----|--------|--------|-----|
|-----|--------|--------|-----|

| | | First | Second | Third | Fourth |
|---------|----------|-------|--------|-------|-----------|
| | Intact | 3.97 | 15.75 | 34.98 | 61.15 |
| Bridge | Damage 1 | 4.96 | 16.00 | 46.12 | 64.56 |
| | Damage 2 | 4.10 | 17.70 | 43.46 | 83.18 |
| Vehicle | | 13.32 | 13.67 | 655.0 | 655.1 |
| | | | | J) | Jnit: Hz) |

3 数値シミュレーションによる FDD 法の適用性検証

3.1 数値シミュレーションモデルの作成

FDD 法の適用性を検討するために、VBI (Vehicle-Bridge Interaction:車両-橋梁相互作用)システムの 簡易数値シミュレーションを行う。車両には Half-Car モデルを、橋梁には一次元有限要素梁モデルを 用いた。VBIシステムモデルを図1に示す。車両は 橋梁振動と路面凹凸の和から成る強制変位入力に より振動し、橋梁は車両の接地力を外力として、振 動を生じる。適用した路面凹凸を図2に示す。この 路面凹凸は、実計測データに基づきランダムに発生 させたものを用いている^[20]。表1には、車両と橋梁 のパラメータを示す。これらのパラメータは既往の 研究^[21]を参考に設定した。

損傷による振動特性の変化を評価するため、ここでは2種類の損傷モデルを導入した。Damage1は、 スパン中央における局所損傷であり、位置L/2、幅 L/6、剛性低下率10%である。一方、Damage2は桁 端部の局所損傷であり、損傷位置L/12および11L/



12、幅それぞれL/6、剛性低下率10%である。表2 には、参考値として、それぞれのケースにおける橋 梁および車両の非減衰固有振動数を示している。ま た、健全時(Intact)と損傷時(Damage1)における 橋梁モード形状を図3に示す。モード形状は、剛性 が均一な健全時にはサインカーブとなるが、局所的 な剛性低下が生じると、その位置で振幅が変化する。 動的シミュレーションにあたっては、Newmark-β 法を用いた。

3.2 数値シミュレーションによる検討結果

FDD 法によって導かれた 1 次と 2 次の特異値ス ペクトルを図 4、図 5 に示す。1 次の特異値スペク トルとは、最も卓越した実稼働モードの振幅に相当 する。図 4 (a)に示された 1 次の特異値スペクトルよ り 2 次モードの卓越が確認される。一方、2 番目に 大きな成分を表す 2 次の特異値スペクトルには、1 次モードや 3 次モードが確認できる。損傷、路面凹 凸の違いにより卓越する周波数は変化するが、いず れの場合も 1 次の特異値スペクトルで 2 次モードが 卓越していることが分かる。また、中央に損傷があ る場合、1 次のモードが他の場合に比べて卓越する



また、モード形状の推定精度評価には MAC (Mode Assurance Criterion:モード信頼性評価基準) 値^{DD}を導入する。MAC 値は次式で定義される。

$$\boldsymbol{MAC_{kl}} = \frac{\left(\sum_{j} \bar{A}_{jk} \hat{A}_{jl}\right)^{2}}{\left(\sum_{j} \bar{A}_{jk}^{2}\right) \left(\sum_{j} \hat{A}_{jl}^{2}\right)}$$
(15)

ここで、*MAC_{kl}はk*次のモード形状の推定値と*l*次の モード形状の正解値の形状の近さを示しており、値 が1に近いほど形状の近さを表している。

図6は各ケースにおいて FDD 法によって推定さ れたモード形状と正解値の MAC 値を示す。図6(a) に示されている通り、2次の MAC 値はほぼ1 に近 く、正解値によく一致しているが、1次と3次の MAC 値はほとんど一致していないことが分かる。これは、 2次のモードだけが卓越していることを示している。 一方、図6(b)では損傷による影響で1次の MAC 値 が1次モード付近で1に近づいている。しかし、い ずれの場合も2次のモードが卓越する。

FDD 法では卓越する実稼働モードの推定が可能 で、それ以外のモード形状を見出すことが難しいこ とが示された。一方、路面凹凸、損傷の変化により 実稼働モードが変化することも示されている。

4 MEMS センサの利用と課題

本研究では全て市販の部品を用いた。使用したセンサ部品を表3の通りである。実装されたセンサシステムの外観は図7のようになった。

本研究では MEMS センサの全体を制御するマイ コンとして Nucleo-F401RE を用いた。Nucleo は規定 値 16 MHz の CPU を持ち、PC と USB ケーブルで接 続することで PC 側から電源供給を受けている。ま た PC とはシリアル通信も行っており、得られたデ ータを PC に送り保存している。将来的には SD カ ード書込み機能を組み込む予定である。

加速度センサ KXR94-2050 の測定レンジは±2 g で、測定振幅は電源電圧 3.3 mV のとき 660 mV/g で ある。本加速度センサは 3 軸測定が可能であるが、 本研究ではz 軸鉛直方向のみを利用した。用いた AD コンバータ ADS1220 の分解能は 24bit である。本研 究では変換速度 330SPS (Sample Per Second) に設定 した。AD コンバータはマイコン側からの指令によ り変換を開始するため、PC とのシリアル通信がマ イコンの負荷となり、およそ実際には 270Hz の変換 速度となっている。

200911160 ASAKAWA - 6

表3 MEMS センサで使用した各モジュール

| 部品名 | 製品名 |
|-----------------|---------------|
| マイコンボード | Nucleo-F401RE |
| 加速度センサ・モジュール | KXR94-2050 |
| AD コンバータ(24bit) | ADS1220 |
| GPS センサ | GMS6-CR6 |
| 安定化電源回路 | ADP150 |







図7 加速度センサシステム



図9 センサボックスと計測用 PC のセット



図10 松美橋の断面図およびセンサ設置位置

加速度センサは電源電圧により出力振幅とオフセット電圧が変化する。また、AD コンバータも電源電 圧を基準として分解幅が決まり、精度の高い測定のためにはノイズの少ない安定した電源が必要である。本 研究では、安定化電源回路 ADP150 を用い安定電源を 確保した。ADP150 はマイコンから 5V の電源供給を 受け、出力電圧 3.3V で加速度センサと AD コンバー タに電源供給している。

複数のセンサシステムを時刻同期するために、GPS を利用した。GPS センサは GMS6-CR6 は 1Hz で GPS データを出力する。本研究では計測開始時に時刻同期 を行った。MEMS センサを利用する性質上、データエ ラー等が生じることや、センサ間で各データの記録時 間が異なることから、全データでスプライン補間を適応し、200SPSのデータとした上でFDD法を適用した。

5 実橋梁での計測結果と考察

5.1 実橋での計測

実橋梁計測は、筑波大学学内道路かえで通りに架 かる陸橋の松見橋(図8)にて行った。センサの設置 状況を図9に示す。松見橋は全長31mの箱桁橋であ り、平面図と縦断図を図10に示す。

加速度センサは風がノイズ要因になるのでセンサ

200911160 ASAKAWA - 7



ックスの中に入れ、歩道脇に図9のように両面テープ により固定した。センサの設置数はで四箇所で、図8 の赤い点が設置地点である。

測定した橋梁振動は一般車両に通過による加振で ある。図 11 は得られた橋梁振動である。横軸は時間 軸で、GPS データの形式の都合上、計測日当日の午前 0 時からの経過時間を表している。縦軸は正規化した 加速である。また、DATA1 はセンサシステムのエラ ーのため途中からの計測になっている。

5.2 FDD 法の適用

本研究では、計測振動データの一部を抜き出して特 異値分解と FDD 法を適用した。抜き出したデータは 図の黒枠部で、図12はそれを拡大したところである。 データは車両通過により橋梁が振動し、自由振動を経 て定常状態へ推移していくところを示している。

図 13 は加速度データに直接特異値分解を適応し、 得られた推定モード形状を示したものである。1 次と 2 次のたわみおよびねじりモードが推定できた。

次にデータに FDD 法を適応し、特異値スペクトル を得た(図 14)。1 次の特異値スペクトルにおける卓越 した振動数は 4.2Hz、13Hz、19Hz、29Hz であった。

ここで、計測データの特異値分解によって得られた モード形状と、FDD 法によって得られたモード形状を MAC 値によって比較したものを図 15 に示す。





図 16 FDD 法で推定されたモード形状 (7.48Hz)

FDD 法は全ての周波数においてモード形状を推定 する。図 15 の 1 次の MAC 値において、7.48Hz、15.7Hz で卓越するモード形状が 1 次モードとは異なっている。 図 16 に FDD 法における 7.48hz 時の推定モード形状 を示す。このときモード形状が 2 次の曲げモードにな っていると推定される。

6 まとめ

本研究では数値シミュレーションと実橋梁計測に よる FDD 法の適用性検証を行った。以下に本研究の 結論をまとめる。

- 1次元有限要素法により、交通振動を再現し、 離散計測点上で得られた橋梁振動データに対 して FDD 法を適用した。FDD 法の結果、卓越 する実稼働モード対しては非常に高精度なモ ード推定が可能なものの、それ以外のモード 形状においてはモード推定が困難なことを確 認した。
- ただし、FDD 法で求められる特異値スペクト ル上には各次の固有振動数付近でピークが現 れることから、固有振動数推定においては有 効である。



- 3) 数値シミュレーションにおいては、橋梁損傷 ケースについても同様の検討を行ったが、概 ね同様の傾向が得られた。ただし、卓越する実 稼働モードの比率が変化することが確認され、 FDD 法を用いた橋梁損傷検知の可能性が示さ れた。
- 4) 本研究では、交通振動計測に特化した MEMS センサの開発を行った。市販のマイコンモジ ュールを用いて、高分解能で容易に時刻同期 可能な独立したセンサシステムの構築を可能 とした。
- 5) 次に、開発した MEMS センサを用いて実橋梁 における多点計測を実施した。モード形状推 定においては FDD 法と特異値分解を用いた。 結果より、FDD 法は様々な実稼働モードにお いてモード形状を交通振動から推定した。

開発した MEMS センサは互いに無線通信をするこ となく独立して作動するにもかかわらず、GPS により 時刻同期を取り、橋梁多点計測における有効性を示し た。今後は、電源とデータ・ロギング機能を備えたよ り自律性の高い MEMS センサの開発を進めていく予 定である。

また、計測点数を増やした上で交通振動分析への FDD 法の適応性について検討を進める。検討にあたっ ては温度や風などの環境外乱やセンサ配置、サンプリ ングレート、設置コストなどの各要素を考慮し、適切 な計測条件を明らかにしていく。

参考文献

- [1] 社会資本整備審議会道路分科会:道路の老朽化 の本格実施に関する提言
- [2] トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討 委員会:トンネル天井版の落下事故に関する調 查·検討委員会報告書
- [3] 道路法施行規則 第四条の五の二
- [4] 吉岡 勉, 原田 政彦, 山口 宏樹, 伊藤 信: 斜材 の実損傷による鋼トラス橋の振動特性変化に関 する一検討 構造工学論文集 Vol.54A pp.199-208, 2008
- [5] 稻垣博信,水野裕介,藤野陽三,河村圭:地方自 治体における橋梁の維持管理の状況と投資効果 に関する調査検討,土木学会論文集 Vol.66F, pp.351-359, 2010
- Zhu, X.Q. and Law, S.S.: Wavelet-based crack [6] identification of bridge beam from operational deflection time history, International Journal of Solids and Structures, 43, pp.2299-2317, 2006.
- Toshinami, T., Kawatani, M. and Kim, C.W. : [7] Feasibility investigation for identifying bridges fundamental frequencies from vehicle vibrations, Bridge maintenance, safety, management and lifecycle optimization, IABMAS 2010, pp.317-322, 2010.
- [8] 長江信顕, 渡瀬正泰, 玉木利裕: 相互相関関数 を用いた実稼働モード解析,構造工学論文集 Vol.57A, pp.232-241, 2011.
- [9] 西村昭,藤井学,宮本文穂,加賀山泰一:橋梁の 損傷評価における力学的挙動の有効性, 土木学 会論文集 I-7, No.380, pp.355-364, 1987
- [10] 古川愛子,清野純史,大塚久哲:独立成分分析を 用いた起振応答の抽出法と損傷同定問題への適 用, 応用学論文集, Vol.9, pp.43-54, 2006
- [11] Kim, C. W., Kawatani, M. and Ozaki, R. : Modal identification of short and medium span bridges under moving loads, Proc. of 10th ICOSSAR,

pp.2446-2452, 2009.

- [12] Hearn, G. and Testa, G. R. : Modal analysis for damage detection in structures, Journal of Structural Engineering, Vol.117, pp.3042-3063, ASCE, 1991.
- [13] Xia, Y., Hao, H., Brownjohn, J. M. W. and Xia, P.-Q. : Damage identification of structures with uncertain frequency and mode shape data, Earthquake Engineering and Structure Dynamics, Vol.31, pp.1053-1066, 2003.
- [14] 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
- [15] A. Gonzalez, E.J. Obrien, P.J. McGetrick: Identification of damping in a bridge using a moving instrumented vehicle, Journal of Sound and Vibration, Vol.331, pp.18-27, 2012
- [16] 吉岡勉, 伊藤信, 山口宏樹, 松本泰尚: 鋼トラス 橋の斜材振動連成とモード減衰変化を利用した 構造健全度評価, 土木学会論文集, Vol.66A, pp.516-534, 2010
- [17] 貝戸清之,阿部雅人,藤野陽三:不確実性に起因 する振動特性変化の定量化とその有意性検定手 法, 土木学会論文集 I56, pp.399-414, 2001
- [18] 西村昭,藤井学,宮本文穂,加賀山泰一:橋梁の 損傷評価における力学的挙動の有効性, 土木学 会論文集 I-7, No.380, pp.355-364, 1987
- [19] Rune Brincker, Lingmi Zhang and Palle Andersen: Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition, Proceeding of SPIF, the International Society for Optical Engineering, Vol.4359 (1), pp.698-703, 2001.
- [20] 川谷充朗, 小林義和, 高森和恵: 曲げとねじり を考慮した単純桁橋の走行荷重による非定常 連成不規則振動解析, 土木学会論文集, pp.231-238, 1997
- [21] 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

謝辞

山田先生、松島先生、山本先生のご教授なしには本研究は遂行できませんでした。深くお礼申し上げます。 また、大学生活を長くに渡り支えてくださった両親、家族に心より感謝を申し上げます。皆様、ありがとうご ざいました。

200911160 ASAKAWA - 9