

高精度構造同定システムによる橋梁振動計測

岡林隆敏*・奥松俊博*・房前慎一**
増田大樹**・木村啓作**Bridge Vibration Measurement by
High Accurate-Structural Characteristic Identification

by

Takatoshi OKABAYASHI*, Toshihiro OKUMATSU*, Shinichi FUSAMAE
Daiju MASUDA** and Keisaku KIMURA**

High accurate structural identification is indispensable to recognize the level of structural deterioration. It is considered that the frequency of structures would be decreased when structure deteriorated. In this study, vibration-estimation test was conducted at an existing bridge with the High Accurate Structural Vibration Estimation System, developed by the authors. This paper shows the abstract of the system and test results.

1. はじめに

構造物は供用年数とともに老朽化し、損傷発生頻度が高くなる。既存構造物を延命化するためには、適切な維持管理を行う必要がある。戦後の国土復興と、よりよい生活環境の構築のために、これまで多くの高規格道路が計画・建設され、現在わが国が抱える社会資本ストックは膨大なものとなった。このような膨大な量の構造物を維持管理のためには、構造物の健全度を的確に評価する技術の確立が必要である。

このような背景から、構造物の健全度評価のための理論の開発や実用化実験、また実構造物への適用が行われてきた。安部ら¹⁾は、常時微動による構造同定を行い実橋梁の振動計測を行った。Peetersら²⁾は、橋梁長期モニタリングの実施により、影響因子と損傷の関係について検討を行った。また被災前後の構造物の剛性評価から、剛性および振動数の低下現象について明らかにした研究もある^{3),4)}。

橋梁の構造上の変態を振動数の変動から検出するためには、高精度に振動数を検出できる計測器の開発が必要となる。さらに、橋梁振動の長期計測により橋梁の構造

的変動を定性的・定量的に把握し、振動数の変化と構造物の健全度を関連付ける必要がある。

このような視点から、著者らは、常時微動からARモデルに基づいて構造同定を行い、構造物の振動数を高精度に検出する理論の開発と、自動計測を実現するための計測システムの開発を行ってきた^{5),6)}。また、常時微動シミュレーションと模型実験の両面から本システムの有効性を検証した^{8),9)}。

本研究は、道路橋の長期変状計測による健全度評価法の確立を視野に入れた、本システムによる実橋梁への適用実験として位置付けるものである。実橋梁を対象に本システムによる振動数推定実験を実施し、本システムの有効性を検証した。長崎市に架設されている2径間連続鋼斜張橋を対象として、常時微動による振動数推定を行った結果、本システムは1%程度未満の振動数推定精度を確保できることが分かった。

本論文では、ARモデルに基づく構造同定理論とモニタリングシステムの概要、また2径間連続鋼斜張橋の振動数推定実験の概要とその結果について報告するものである。

平成15年10月24日受理

*社会開発工学科 (Dept. of Civil Engineering)

**大学院生産科学研究科 前期課程(Graduate Student, Dept. of Civil Engineering.)

2. 高精度構造同定法

(1) 運動方程式の ARMA モデルへの変換

m 自由度系の運動方程式は,

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{y}(t) = \mathbf{f}(t) \quad (1)$$

与えられる. ここに, $\mathbf{y}(t), \mathbf{f}(t)$ は m 次元の変位ベクトルと外力ベクトルである. また, \mathbf{M}, \mathbf{K} および \mathbf{C} は, それぞれ $(m \times m)$ の質量行列, 剛性行列および減衰行列である. 減衰を比例減衰系

$$\mathbf{C} = \alpha\mathbf{M} + \beta\mathbf{K} \quad (2)$$

と仮定する. 非減衰系の振動モード行列 Φ ($m \times m$) により, $\mathbf{M}, \mathbf{K}, \mathbf{C}$ は次のように対角化できる.

$$\Phi^T \mathbf{M} \Phi = \mathbf{I} \quad (3-1)$$

$$\Phi^T \mathbf{K} \Phi = [\omega_k^2] = \Omega \quad (3-2)$$

$$\Phi^T \mathbf{C} \Phi = [2h_k \omega_k] = \mathbf{H} \quad (3-3)$$

ここに, ω_k, h_k は, それぞれ k 次の固有円振動数および減衰定数である.

振動モード行列 Φ と基準座標行列 $\mathbf{q}(t)$ により運動方程式は次のように表される.

$$\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{H}\dot{\mathbf{q}} + \Omega\mathbf{q} = \Phi^T \mathbf{f}(t), \quad \mathbf{y}(t) = \Phi\mathbf{q}(t) \quad (4)$$

ここに $\mathbf{q}(t)$ は m 次元ベクトルである.

状態変数を

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{q}(t) \\ \dot{\mathbf{q}}(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

で定義すると, 基準座標で表された運動方程式は状態方程式として,

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{f}(t) \quad (6-1)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \quad (6-2)$$

で表される. ここに,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\Omega & -\mathbf{H} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \Phi^T \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = [\Phi \quad \mathbf{0}] \quad (7)$$

である. なお, 以後, 式の簡略化のために変数の次元を $2m = n$ と表す. $\mathbf{x}(t)$ は n 次元のベクトル, $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ はそれぞれ, $(n \times n)$ 行列, $(n \times m)$ 行列および $(m \times n)$ 行列である. 連続系の運動方程式を h で離散化すると, 離散化された運動方程式は,

$$\mathbf{x}_{k+1} = \hat{\mathbf{A}}\mathbf{x}_k + \hat{\mathbf{B}}\mathbf{f}_k \quad (8-1)$$

$$\mathbf{y}_k = \hat{\mathbf{C}}\mathbf{x}_k \quad (8-2)$$

となる. ここに $\mathbf{x}_k, \mathbf{f}_k$ および \mathbf{y}_k は, それぞれ $t = t_k$ のときの $\mathbf{x}(t), \mathbf{f}(t), \mathbf{y}(t)$ の値を表している. ここで, $\hat{\mathbf{A}}, \hat{\mathbf{B}}$ および $\hat{\mathbf{C}}$ は, 以下で表される.

$$\hat{\mathbf{A}} = e^{\mathbf{A}h}, \quad \hat{\mathbf{B}} = \mathbf{A}^{-1}(e^{\mathbf{A}h} - \mathbf{I})\mathbf{B}, \quad \hat{\mathbf{C}} = \mathbf{C} \quad (9)$$

ここで, (8) 式の状態方程式において, 1 入力 1 出力の系を考える. すなわち, 外力ベクトル \mathbf{f}_k の代わりに f_k を考え, 出力ベクトル \mathbf{y}_k の代わりに y_k を考える.

可観測行列は次式で構成される.

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{C}} \\ \hat{\mathbf{C}}\hat{\mathbf{A}} \\ \vdots \\ \hat{\mathbf{C}}\hat{\mathbf{A}}^{n-1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$\text{rank}[\mathbf{Q}] = n$ のとき, (8) 式の系は可観測となる.

$$\mathbf{Q}\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{C}}\hat{\mathbf{A}} \\ \hat{\mathbf{C}}\hat{\mathbf{A}}^2 \\ \vdots \\ \hat{\mathbf{C}}\hat{\mathbf{A}}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ & & & \ddots & \vdots \\ & & & & 1 \\ -a_n & -a_{n-1} & \cdots & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{C}} \\ \hat{\mathbf{C}}\hat{\mathbf{A}} \\ \vdots \\ \hat{\mathbf{C}}\hat{\mathbf{A}}^{n-1} \end{bmatrix} = \bar{\mathbf{A}}\mathbf{Q} \quad (11)$$

となり, この \mathbf{Q} により \mathbf{x}_k を変換する.

$$\bar{\mathbf{x}}_k = \mathbf{Q}\mathbf{x}_k \quad (12)$$

ここで \mathbf{Q} を (8-1) 式の左辺より乗じると, 次式を得る.

$$\bar{\mathbf{x}}_{k+1} = \bar{\mathbf{A}}\bar{\mathbf{x}}_k + \bar{\mathbf{B}}f_k \quad (13-1)$$

$$\mathbf{y}(t) = \bar{\mathbf{C}}\bar{\mathbf{x}}_k(t) \quad (13-2)$$

ここに,

$$\bar{\mathbf{A}} = \mathbf{Q}\hat{\mathbf{A}}\mathbf{Q}^{-1}, \quad \bar{\mathbf{B}} = \mathbf{Q}\hat{\mathbf{B}}, \quad \bar{\mathbf{C}} = \hat{\mathbf{C}}\mathbf{Q}^{-1} \quad (14)$$

である. さらに,

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ & & & 1 \\ -a_n & -a_{n-1} & \cdots & -a_1 \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \bar{b}_1 \\ \vdots \\ \bar{b}_n \end{bmatrix}, \quad \bar{\mathbf{C}} = [1 \quad 0 \quad \cdots \quad 0] \quad (15)$$

である.

(13) 式より ARMA モデル^{10,11)}を誘導する. (13-1) 式を要素毎にまとめ, それぞれ $\bar{x}_1(k)$ を用いて表す. さらに, $\bar{x}_1(k) \sim \bar{x}_n(k)$ を $y(k)$ で表すことで, 以下の式が得られる.

$$\begin{aligned} \bar{x}_1(k) &= y(k) \\ \bar{x}_2(k) &= y(k+1) - \bar{b}_1 f(k) \\ \bar{x}_3(k) &= y(k+2) - \bar{b}_1 f(k+1) - \bar{b}_2 f(k) \\ &\vdots \end{aligned} \quad (16)$$

$$\bar{x}_n(k) = y(k+n+1) - \sum_{s=1}^{n-1} \bar{b}_s f(k+(n-1-s))$$

(16) 式をベクトルで表示する.

$$\begin{bmatrix} \bar{x}_n(k) \\ \vdots \\ \bar{x}_1(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(t+n-1) \\ \vdots \\ y(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & \bar{b}_1 & \cdots & \bar{b}_{n-1} \\ 0 & 0 & \bar{b}_1 & \cdots & \bar{b}_{n-2} \\ & & & \ddots & \bar{b}_1 \\ 0 & \cdots & 0 & & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f(k+n-1) \\ \vdots \\ f(k) \end{bmatrix} \quad (17)$$

(17) 式を変形して整理することにより ARMA モデルが得られる.

$$y(k) = -\sum_{s=1}^{n-1} a_s y(k-s) + \sum_{s=1}^{n-1} b_s f(k-s) \quad (18)$$

(2) AR モデルによる振動特性推定^{12),13)}

ARMA モデルは次数 ∞ の AR モデルと等価であると考えることができる。そこで、比較的次数の大きな AR モデルで ARMA モデルを近似する。

$$y(k) + \sum_{s=1}^p a_s y(k-s) = e(k) \quad (19)$$

時系列 $y(k)(k=0 \sim N)$ より、パラメータ $a_1 \sim a_p$ を、過去のデータ $y(k-1) \sim y(k-p)$ より $y(k)$ を推定する。

$$\hat{y}(k) = -\sum_{s=1}^p \hat{a}_s y(k-s) \quad (20)$$

$y(k)$ との推定誤差を

$$e(k) = y(k) - \hat{y}(k) \quad (21)$$

として、推定誤差の二乗平均値を最小にするようにパラメータ $a_1 \sim a_p$ を決める。

$$\frac{\partial}{\partial a_s} E[e(t^2)] = 0 \quad (22)$$

ここに、 $E[e(t^2)]$ は数学的的平均を表している。

$$\mathbf{R}\mathbf{a} = \mathbf{r} \quad (23)$$

の Yule-Walker 方程式が得られる。

$$\mathbf{a} = [a_1 \dots a_p]^T \quad (24)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_0 & \dots & \dots & R_{p-1} \\ R_1 & R_0 & & R_{p-2} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ R_{p-1} & \dots & \dots & R_0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{r} = \begin{bmatrix} R_1 \\ \vdots \\ R_p \end{bmatrix} \quad (25)$$

ここに、 $R_s = E[y(k)y(k+s)]$, $R_s = R_{-s}$

また、最適な誤差の2乗平均値は、

$$\sigma_e^2 = R_0 + \sum_{s=1}^p a_s R_s \quad (26)$$

となる。時間遅れ演算子を z^{-1} とすると、(19)式の伝達関数は

$$y(k) = \frac{1}{1 + \sum_{s=1}^p a_s z^{-s}} e(k) \quad (27)$$

で表すことができる^{14),15)}。AR モデルの特性方程式は

$$z^p - a_1 z^{p-1} - a_2 z^{p-2} \dots - a_p = 0 \quad (28)$$

となる。この特性方程式の根が、構造系の固有値に対応する。(28)式は、

$$\prod_{i=1}^{p/2} (\lambda - \lambda_i)(\lambda - \lambda_i^*) = 0 \quad (29)$$

となる。ここに λ_i^* は λ_i の複素共役である。固有値を

$$\lambda_i = \lambda_{Re}^i - i\lambda_{Im}^i \quad (30)$$

とすると、固有値とモーダルパラメータとの関係は、

$$h_i \omega_i = (-1/\Delta) \ln \sqrt{\lambda_{Re}^2 + \lambda_{Im}^2}, \quad \omega_i \sqrt{1-h_i^2} = (1/\Delta) \tan^{-1}(\lambda_{Im}^i / \lambda_{Re}^i) \quad (31)$$

となり、固有円振動数と減衰定数を推定できる。

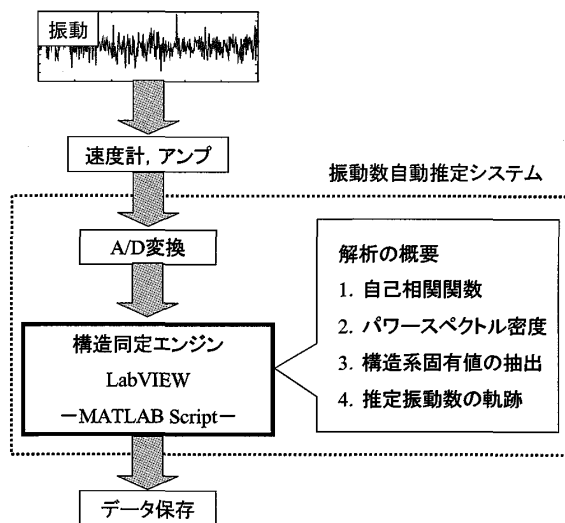


図-1 振動数自動推定システムの流れ

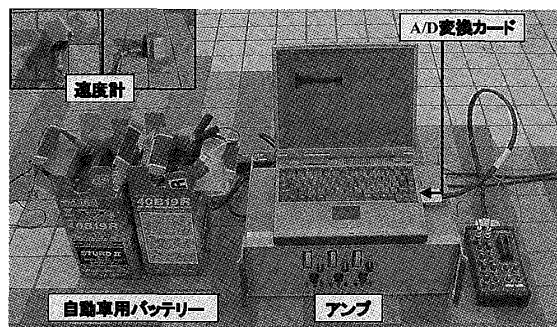


図-2 計測システム

3. 振動数自動推定システム

(1) システムの概要

振動数自動推定システムの流れを図-1に示した。振動数自動推定システムは、速度計で検知した橋梁の常時微小振動を増幅した後、A/D変換カードでデジタル変換してノート型パソコンに取り込む。パソコンには構造同定エンジンを搭載しており、振動数を自動的に推定する。設定した時間間隔ごとに振動数が推定され、経時的な振動数の変化を把握することができる。図-2は、計測システム全体を示したものである。パソコンを主体として構成することにより、可搬型の計測システムを実現した。現場計測に対応させるため、本システムの電源供給方法として自動車用バッテリーを用いた。

(2) 開発プログラム

橋梁振動の計測・解析の一連の作業を実時間かつ効率的に行うための、構造同定エンジンを開発した。プログラム開発ツールは、仮想計測器ソフトウェア LabVIEW を

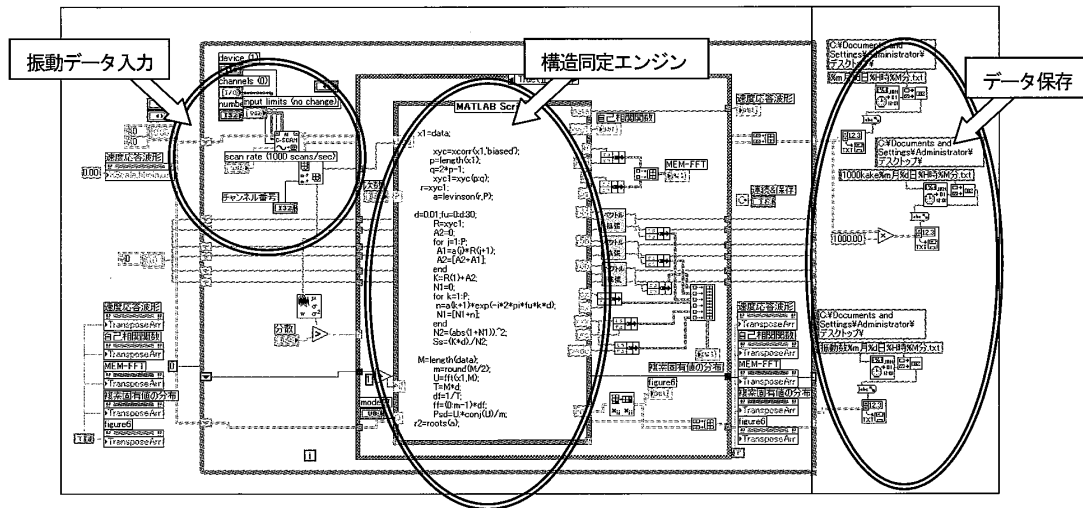


図-3 LabVIEWによる開発プログラム

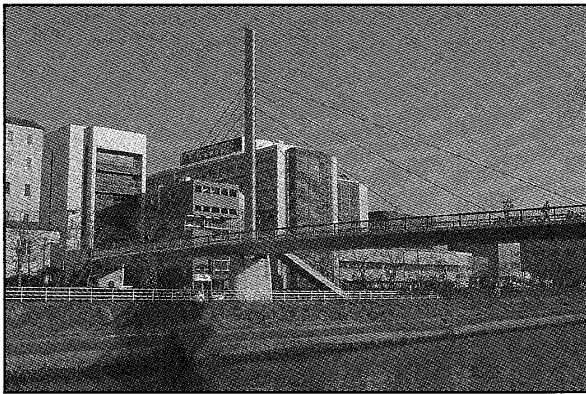


図-4 浦上歩道橋

使用した。橋梁に設置した速度計で検知した橋梁速度応答データをパソコンに入力し、図-1に示した振動数推定までの流れを経て、構造物の振動数を推定する。パソコンの計測画面には、速度応答波形、自己相関関数、パワースペクトル (MEM・FFT)、複素固有値の分布および推定振動数の軌跡が表示され、計測状況を確認することができる。図-3は、LabVIEWによるプログラム画面を示したものである。図のようなVIと呼ばれる仮想計測器をつなぎあわせることにより、簡易かつ効率的にプログラムを作成することができる。A/D変換された計測データを入力後、数値解析ソフトウェアMATLABで作成した構造同定エンジン部に取り込み、ARモデルに基づく構造同定法により推定振動数が出力される。本システムでは、LabVIEW中でMATLABを動作させるためMATLAB Scriptを用いた。

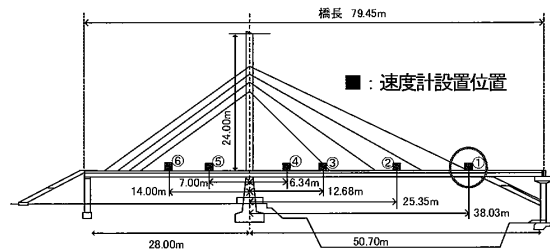


図-5 計測対象橋梁の一般図

表-1 浦上歩道橋の諸元

構造形式	2径間連続鋼斜張橋
橋長	79.45m
有効幅員	4.60m
支間長	左側径間 28.00m, 右側径間 50.70m
塔高	24.50m

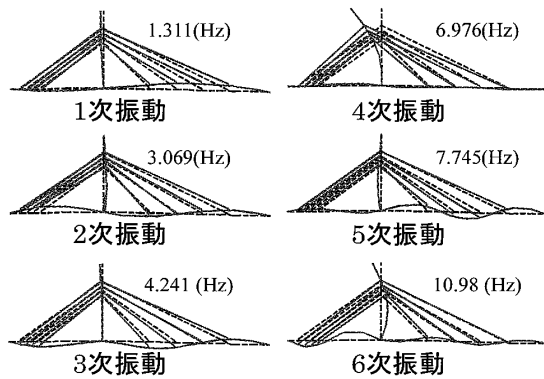


図-6 固有振動モードおよび固有振動数

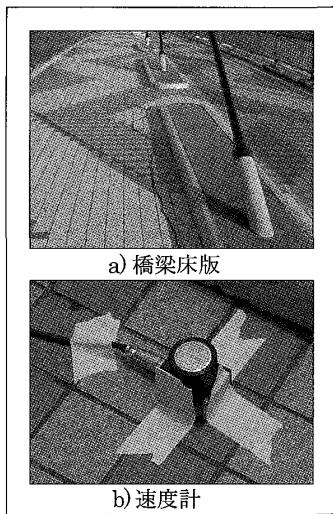


図-7 速度計設置状況

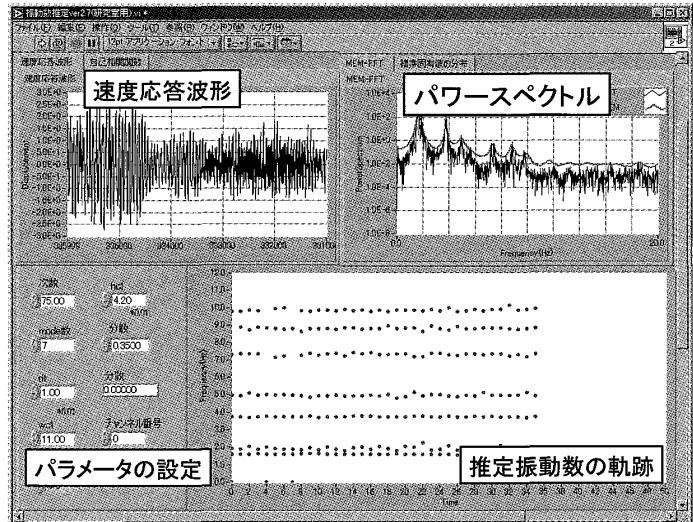


図-8 計測画面

4. 計測対象橋梁

振動数自動推定システムを用いて、長崎市内に架設されている浦上歩道橋の振動数推定実験を実施する。当該橋梁は、1990年に供用開始の、橋長79.45mの2径間連続鋼斜張橋である。浦上歩道橋の全景を図-4に、一般図を図-5に、また諸元を表-1に示す。本研究では、歩行者と風の影響により発生する桁の鉛直方向の振動を速度計により計測した。図-6に振動解析により求めた1次から6次までの固有振動数および固有振動モードを示す。本実験では、速度計を図-5に示すように計測位置を変化させながら、計6点の計測を行った。特に振動モード形状を考慮して、本実験では振動の観測しやすい橋梁右側径間3/4地点(①点)の計測データを採用した。

5. 橋梁振動モニタリング

(1) 計測機器および計測方法

図-2の計測システムを用いて、橋梁床版の鉛直方向の振動数推定実験を実施した。計測点は、前章に示したとおり橋梁右側径間3/4地点とした。振動応答計測のためのサンプリング周波数は100Hzとし、振動数推定に用いる振動速度応答データは60秒間を1回区分とした。速度計は、図-7に示すように橋梁幅員中央部に固定設置した。図-8は、振動推定システムのパソコン上に表示される計測画面である。画面には、橋梁床版鉛直方向の速度応答波形と、MEMとFFTによるパワースペクトル密度および推定振動数の軌跡が表示されている。本システムは、計測中でもマウス操作により、自己相関関数、複素固有

値の分布を表示することが可能であり、逐次計測状況を確認することができる。

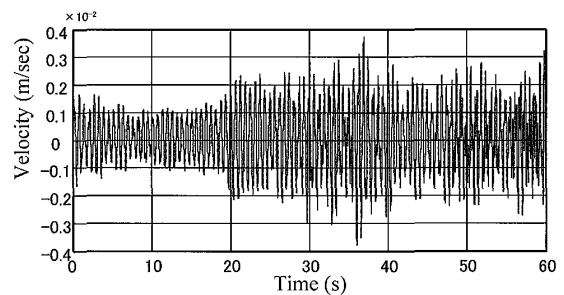


図-9 速度応答

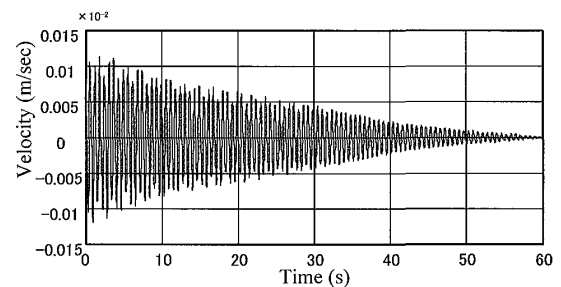


図-10 自己相関関数

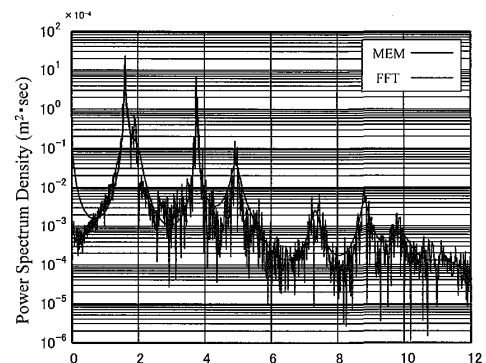


図-11 パワースペクトル密度

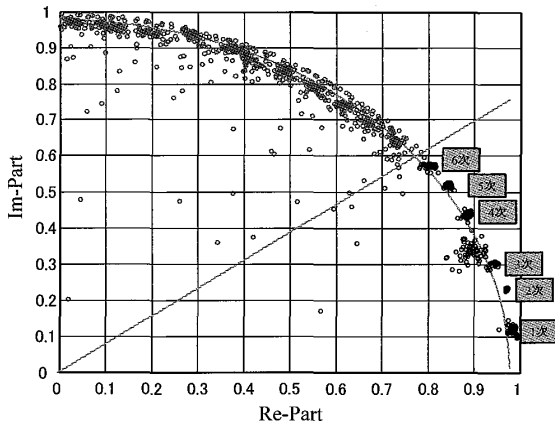


図-12 複素固有値の分布

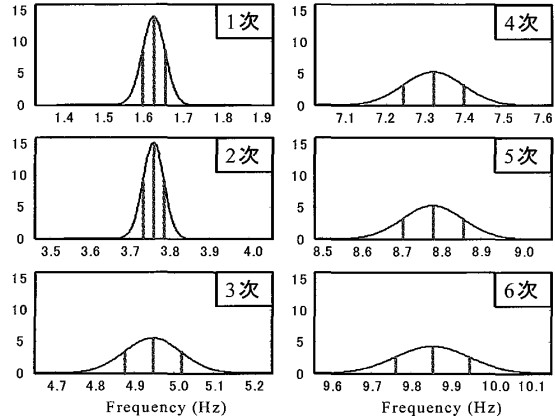


図-14 推定振動数の変動(Gauss 分布)

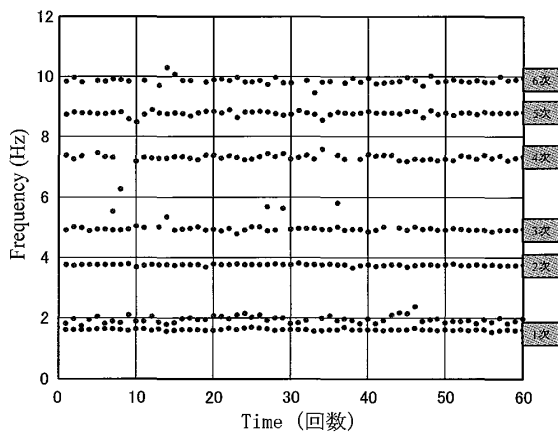


図-13 推定振動数の軌跡

(2) 計測結果

図-5の①地点を計測位置としたときの橋梁床版鉛直方向の速度応答波形を図-9に示す。またその自己相関関数を図-10に示す。この60秒間のデータをもとに、MEMとFFTによるパワースペクトル密度を示したものが図-11である。ここでARモデルの次数 p を $p=80$ に設定している。このときのパワースペクトルを比較するとMEMとFFTでそのピークがよく一致していることから、設定したARモデルの次数が適当であることが分かる。その後、ARモデルに基づき、複素固有値解析を経て振動数が推定できる。

本実験では、60秒間の計測データを1回区分したときの60回分の振動数推定を行った。図-12は、複素固有値解析の結果を、標本関数(N=60)について複素平面上にプロットしたものである。固有値は1点に集中するものと、変動するものが存在していることが分かる。変動の原因は標本関数中に含まれる微細な雑音にARモデルが曲線適合した結果、標本関数ごとに推定結果が変動するためである⁶⁾。この中から構造系だけの固有値を抽出するため

表-2 振動数推定精度

次数	振動数(Hz) (解析値)	推定振動数 平均値(Hz)	標準偏差 (Hz)	変動係数 (%)
1次	1.311	1.622	0.0286	1.763
2次	3.069	3.760	0.0264	0.702
3次	4.241	4.947	0.0721	1.457
4次	6.976	7.318	0.0762	1.041
5次	7.745	8.779	0.0755	0.860
6次	10.978	9.856	0.0930	0.944
ケーブル		1.854		

に、振動数と減衰定数の上限を設定し、複素平面上の半径の下限值 r_c と偏角の上限値 θ_c を決定する。

$$r_c = e^{-h_c \omega_c \Delta}, \quad \theta_c = \sqrt{1 - h_c^2} \omega_c \Delta \quad (32)$$

ここに、 h_c および ω_c は、減衰定数および円振動数、また Δ は時間刻みである。

本実験では、MEMとFFTのパワースペクトル密度の適合性を考慮して $\omega_c = 2\pi * 11(\text{Hz})$ 、 $h_c = 0.035$ とした。

推定振動数の軌跡を図-13に示した。ここに、縦軸は振動数、横軸は推定回数を表す。1次から6次までの推定振動数が推定回数ごとにプロットされ、推定回数全体に渡り、ほぼ一定の振動数を推定していることが分かる。1次振動数(平均値1.622Hz)の上に約2Hzの振動数が推定回数全体にわたり確認される。これについては、後述するとおり、橋梁右側径間の最外側ケーブルの振動数をセンサーが検知したためと考えられる。1次から6次までの推定振動数のGauss分布を示したものが図-14である。各次数の標準偏差を比較するために、横軸の振動数の表示範囲は、各次数とも0.8Hzとした。

表-2は、各次振動数の解析結果、本システムによる推定振動数と標準偏差および変動係数を示したものである。表-2の最下行は、当システムのセンサーを直接、橋梁右側径間の最外側ケーブルに設置して計測した振動数推定

値である。この振動数は、図-13の1次振動数の上にプロットされた振動数に相当していることが分かる。橋梁床版上の計測時、計測点①が橋梁右側径間の最外側ケーブルと桁の連結部付近であったことから、ケーブル振動の影響を受けたと考えられる。

各次振動数の解析結果と推定結果を比較すると、全体に渡り、推定結果が解析結果より高い振動数を示している。この原因として、有限要素法でモデル化する際、2次部材等の省略により解析モデルの剛性が低くなったことが考えられる。定性的傾向が見られることから推定結果および解析結果は、各振動次数に対応しているものと推測できる。

本システムの推定精度について検討すると、各次数とも標準偏差が0.1Hz未満、変動係数は全体的に2%未満を示し推定精度が高いことが確認できる。特に2次、5次、6次振動においては、1%未満の精度で振動数を推定している。このことから、本システムは、実橋の常時微動から、各振動数を1%程度の変動で高精度に推定できることを検証することができた。

6. まとめ

構造物の損傷を振動数の変化から検出するためには、高精度に構造物の振動数を検出し、その変化を定量的・定性的に分析する必要がある。また、効率的な振動計測機器の開発が必要である。

この2つの側面から、本研究では、常時微動から構造物の振動数を高精度に推定するための理論の構築と、自動計測を実現する計測システムの開発を行い、実橋梁に適用した。

本研究をまとめると以下ようになる。

- 1) 橋梁の常時微動より振動数を自動的に推定するシステムを開発した。
- 2) 本システムを実橋の振動数推定に適用した結果、構造物の振動数を標準偏差0.1Hz未満、変動係数1%程度未満で検出できることを検証した。
- 3) 仮想計測器ソフトウェアLabVIEWを使用することで、可搬性のある計測システムと低コスト化を実現した。

本研究により、構造物の振動数を高精度に自動計測できるシステムを実現した。構造物の振動数の自動計測により、橋梁振動の長期的計測、斜張橋の張力管理など、様々な分野への応用が可能である。今後はこのシステムを用いて道路橋の長期計測の実施および健全度評価技術の確立を行う。

参考文献

- 1) 安部雅人, 藤野陽三, 長山智則, 池田憲二: 常時微動計測に基づく非比例減衰系の構造同定と長大吊橋への適用例, 土木学会論文集, No.689/I-57, pp.261-274, 2001
- 2) Peeters, B, De Roeck G: One-year monitoring of the Z24-Bridge: Environmental effects versus damage events, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol.30, pp149-171, 2001
- 3) 中村充, 安井謙: 微動測定に基づく地震被災鉄骨建物の層損傷評価, 日本建築学会論文集第517号, pp.61-68, 1999年
- 4) 関雅樹, 西村昭彦, 佐野弘幸, 中野聡: RC ラーメン高架橋の地震時損傷レベルの評価に関する研究, 土木学会論文集, No.731/I-63, pp.51-64, 2003年
- 5) 岡林隆敏, 山森和博, 讃岐康博, 田村太一郎: 近接固有値を有する構造物の振動特性推定, 土木学会論文集, No. 633/I-49, pp.93-102, 1999年
- 6) 岡林隆敏, 奥松俊博, 中宮義貴: 常時微動モデルによるARモデルを用いた高精度振動特性推定法, 長崎大学工学部研究報告第33巻第60号, pp.129-136, 2003年
- 7) 岡林隆敏, 奥松俊博, 中宮義貴: 常時微動に基づくARモデルによる構造物振動数の高精度自動推定法(土木学会論文集投稿中)
- 8) 岡林隆敏, 糸永洋次郎, 木場俊郎, 奥松俊博: 携帯電話インターネット機能による振動遠隔モニタリングシステムの開発, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.299-307, 2003年
- 9) 村里静則, 岡林隆敏, 棚橋由彦, 木場俊郎, 奥松俊博: トンネル掘削に伴う地盤振動の移動体通信による遠隔モニタリング, 第28回情報利用技術シンポジウム, (印刷中), 2003
- 10) 星谷勝・斉藤悦郎: データ解析と応用・カルマンフィルタを中心として, 鹿島出版会, 1991年
- 11) 添田喬・中溝高好・大松繁: 信号処理の基礎と応用, 日新出版, 1979年
- 12) 中溝高好: 信号解析とシステム同定, コロナ社, 1995年
- 13) 得丸英勝・添田喬・中溝高好・秋月影雄: 計数・測定—ランダムデータ処理の理論と応用, 培風館, 1982年
- 14) 美多勉: デジタル制御理論, 昭晃堂, 1989年
- 15) 伊藤正美: システム制御理論, 昭晃堂, 1973年
- 16) 日野幹雄: スペクトル解析, 朝倉書店, 1977年