

橋梁劣化診断のための高精度振動特性自動モニタリングシステムの開発

長崎大学大学院 学生会員 ○堀川聖太
 長崎大学工学部 フェロー 岡林隆敏
 長崎大学工学部 正会員 奥松俊博

1. はじめに

近年、構造物は長大化し、地震や風などの不規則外力に対して振動が起りやすくなってきている。一方で、数多くの社会資本ストックが老朽化し、維持管理が必要となってきている。そのためには、適切な構造物の健全度評価技術の確立が課題となっている。そこで本研究では多入力構造同定理論を用いて、構造物の振動特性(振動数・減衰定数・振動モード)を高精度推定する手法を開発し、実橋梁に適用した。

2. 対象橋梁

対象橋梁は図-1 に示す樺島大橋である。樺島大橋は、橋長 227m、幅員 7.5m、最大支間 153m の鋼ランガー桁の道路橋である。複数の計測点から得られた多変量常時微動データ(加速度データ)をリアルタイム自動処理することで、橋梁構造物の振動特性の推定を行う。図-2 にセンサー設置状況を示す。



図-1 樺島大橋全景

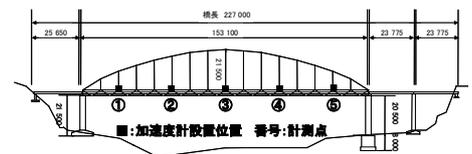


図-2 センサー設置状況

3. 多入力構造同定システム

1) 振動特性推定システム

多変量の常時微動データを用いて、構造物の振動特性を自動推定する多入力構造同定システムを仮想計測器ソフトウェア LabVIEW で作成した。振動特性推定システムの構成材器を図-3 に示す。サンプリング時間を 0.01 秒とし、30 秒間の常時微動データを 1 回区分とした、5 点分の多変量常時微動データを用いて、計 60 回分の振動数、減衰定数を推定した。

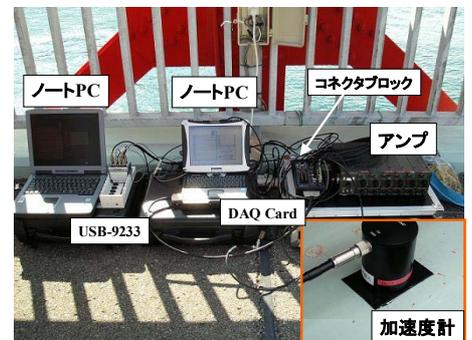


図-3 常時微動計測システム

2) ARE 法(Algebraic Riccati Equation)

本システムに用いた構造同定手法は ARE 法である。以下に ARE 法について示す。

計測データより、ハンケル行列 $H(k-1) = P_\alpha A^{k-1} Q_\beta$ を形成する。¹⁾ここに、 P_α : 可観測行列、 Q_β : 可制御行列である。この時、 $k=1$ の場合の特異値分解について考える。

$$H(0) = P_\alpha Q_\beta = USV^T = US^{1/2}S^{1/2}V^T \quad (1)$$

(1)式より、可観測行列 P_α と可制御行列 Q_β は、以下で表される。

$$P_\alpha = U_n S_n^{1/2} \quad Q_\beta = S_n^{1/2} V_n^T \quad (2)$$

ここで、 $P_\alpha^{\uparrow m}$ を P_α の最初の m 行を消去するものと定義する。さらに、 $P_\alpha^{\downarrow m}$ を P_α の最後の m 行を消去するものと定義する。

$$P_\alpha^{\uparrow m} = U_n^{\uparrow m} S_n^{1/2} \quad P_\alpha^{\downarrow m} = U_n^{\downarrow m} S_n^{1/2} \quad (3)$$

となる。ここに、 $U_n^{\uparrow m}$ は行列 U_n の最初の m 行を、 $U_n^{\downarrow m}$ は行列 U_n の最後の m 行を消去することにより得られる行列である。これより、次の関係式が得られる。

$$U_n^{\downarrow m} S_n^{1/2} A = U_n^{\uparrow m} S_n^{1/2} \quad (4)$$

よって、(3)式、(4)式より、固有値、固有振動モードは、

$$A = S_n^{-1/2} [U_n^{\downarrow m}]^{-1} U_n^{\uparrow m} S_n^{1/2} \quad C = E_m^T U_n S_n^{1/2} \quad (5)$$

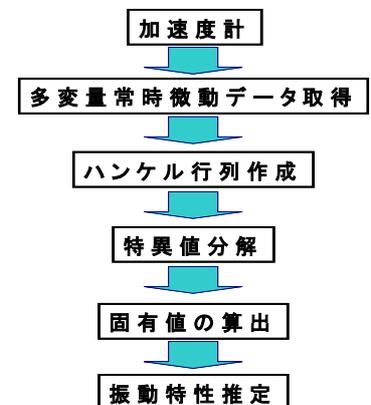


図-4 システムの流れ

となる。 EI_m は観測点数が m の場合を示している。

(5)式において、 A の固有値の実数部分 X_{Re} と虚数部分 X_{Im} より、固有円振動数 ω_k 、減衰定数 h_k が得られる。計算式は次式に示す。

$$h_k \omega_k = (-1/\Delta) \ln \sqrt{X_{Re}^2 + X_{Im}^2} \tag{6}$$

$$\omega_k \sqrt{1 - h_k^2} = (1/\Delta) \tan^{-1}(X_{Im} / X_{Re}) \tag{7}$$

ここで、 Δ は加速度応答のサンプリング時間である。このプログラムを仮想計測器ソフトウェア LabVIEW に組み込み、リアルタイム自動連続計測を可能とした。図-4 に多入力構造同定システムの流れを示し、図-5 に構築したシステムの計測画面(フロントパネル)を示す。

4. 実験結果・考察

本実験では、構造同定アルゴリズムとして ARE 法を用いた多入力構造同定システムにより振動特性の推定を行った。ここでは、各次振動数を明確にするために、単点観測による推定結果を検討した。図-6 は計測点③(1/2点)における振動数推定軌跡である。図より 1Hz, 2~3Hz, 4Hz, 6Hz, 7~8Hz 付近に固有振動数が存在することが確認できた。図-7 は計測点⑤(1/6点)における振動数推定軌跡である。計測点③と比較してばらつきが大きい、2Hz, 3Hz, 4Hz, 6Hz, 7Hz 付近に固有振動数が存在していることが確認できる。図-8 に示すのは 1次~3次の減衰定数軌跡である。各次の平均値は 1次で 0.05, 2次で 0.09, 3次で 0.1 と高次になるにつれて減衰定数が高くなる結果になった。1次振動から 5次振動までの推定振動モードを各最大値で規準化して示したものが図-9である。推定振動モードに関しては、各次振動共に固有振動モードとほぼ同等の形状を示していることを確認した。

なお、今回の計測は 1点計測の多点参照になっており、厳密な多点計測ではない。振動モードのみを多点計測で行っている。

5. まとめ

本論文をまとめると以下のようなになる。

- 1) 多変量常時微動データを用いて振動特性をリアルタイムに推定することを目的とした、多入力構造同定システムの開発を行った。
- 2) 開発した多入力構造同定システムを、樺島大橋に適用し、有効性の検証を行った。そして、本実験より有効性を確認した。
- 3) 今後のシステムの改善点として、実橋梁において、全点観測の振動特性の高精度推定を実現するシステムを構築する必要がある。

【参考文献】 1) Jer-Nan Juang: Applied System Identification, PrenticeHall, 1933, 11

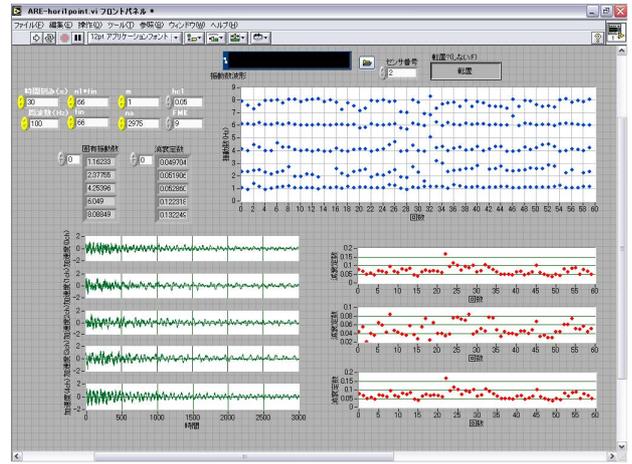


図-5 計測画面(フロントパネル)

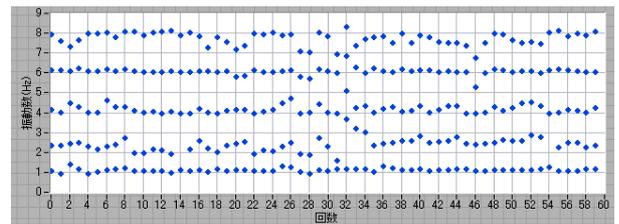


図-6 振動数推定軌跡(1/2点)

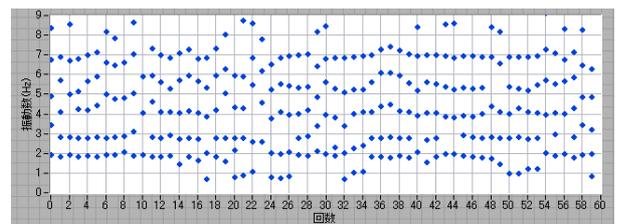


図-7 振動数推定軌跡(1/6点)

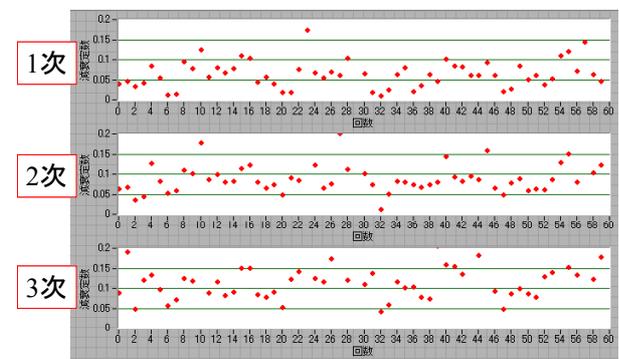


図-8 減衰定数推定軌跡

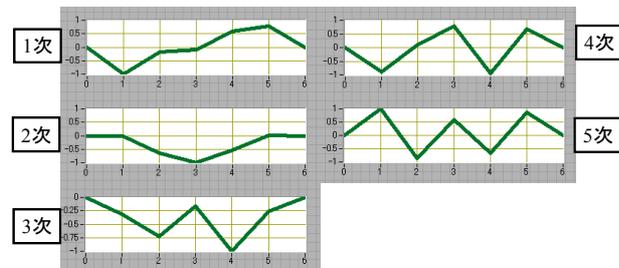


図-9 振動モード