

## 簡易無線計測システムを用いた多次元 AR(MA)モデルによる歩道橋の振動特性推定

神戸大学大学院	フェロー	川谷 充郎	神戸大学大学院	正会員	金 哲佑
神戸大学大学院	学生員	尾崎 隆弥	神戸大学大学院	学生員	郝 婕馨
			(株)ニチゾウテック	正会員	畑中 章秀

## 1. はじめに

橋梁の健全度を診断し、適切な維持管理を行うことが改めて重要な課題となっている。通常、構造物においては、部材の損傷や劣化は固有振動数、減衰比や振動モード等の動特性の変化として現れることから、振動モニタリングによる構造物の健全度評価は有効であると報告されている<sup>1)</sup>。振動モニタリングで重要な項目の一つは振動データの計測であるが、従来の有線加速度計による計測では、配線作業や設置、また振動特性推定のためのデータ処理にも多大な時間と労力を費やしてしまうという欠点がある。そこで本研究では、橋梁振動モニタリングにおけるニーズにより開発された簡易無線計測システムを用いてデータ計測を行い、さらに振動特性推定の自動化により、より迅速かつ容易な振動モニタリングを図るため、多次元AR(MA)モデルの利用を検討する。具体的には、簡易無線計測システムを用いて歩道橋における常時微動計測を行い、多次元AR(MA)モデルによる振動数、振動モードおよび減衰定数の推定を行う。また、その推定結果はFFTによるフーリエ振幅スペクトルから得られた結果と比較し、多次元AR(MA)モデルの利用可能性を検討する。

2. 多次元AR(MA)モデル<sup>2)</sup>

構造モデルに外力が作用する場合、運動方程式は

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = f(t) \quad (1)$$

と表される。M, C, Kは質量マトリクス、減衰マトリクス、剛性マトリクス、 $f(t)$ は外力ベクトルである。この運動方程式を離散化および可観測変換した状態方程式は、

$$\hat{x}(k+1) = \hat{A}\hat{x}(k) + \hat{B}f(k) \quad y(k) = \hat{C}\hat{x}(k) \quad (2)$$

と表すことができ、これをARMAモデルとなる差分表現すると、

$$y(k) + \sum_{s=1}^p G_s y(k-s) = \sum_{s=1}^p R_s e(k-s) + e(k) \quad (3)$$

となる。また、多次元ARMAモデルは無限な多次元ARモデルで表すことができるが、ここでは近似的に $p$ 次ARモデルとして考える。よって、(3)式は

$$y(k) + \sum_{s=1}^p G_s y(k-s) = e(k) \quad (4)$$

と表される。 $y(k)$ が定常な時系列で、 $e(k)$ が白色雑音であると仮定すると、(4)式の両辺に $y(k)$ をかけ、数学的平均による分散、共分散行列と、ARの係数である $G_s$ に関するYule-Walker方程式が誘導できる。

Yule-Walker方程式より、可観測変換された状態方程式の係数行列 $\hat{A}$ の要素である $G_1 \sim G_p$ が算出でき、係数行列 $\hat{A}$ の固有値解析を行うことにより、固有値と固有ベクトルが得られる。

## 3. 常時微動実験

3.1 簡易無線計測システム 本研究で導入する簡易無線計測システムは、Fig.1に示す(株)ニチゾウテックの「簡易取付型加速度記録計(KRA-2C)」である。計測器はセンサーと記録部および電源(単三電池)部が一体型となっており、構造物に計測器を設置するだけで3軸成分の計測が可能である。加速

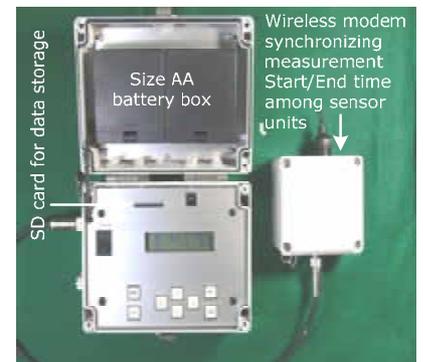


Fig.1 Handy wireless sensor unit.



Fig.2 Observation bridge.

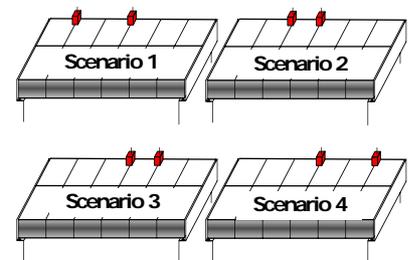


Fig.3 Sensor location and measurement scenarios.

キーワード 簡易無線計測システム, 多次元AR(MA)モデル, 振動モニタリング, 歩道橋

連絡先: 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 Tel: 078-803-6383

度センサーは Analog Devices 社の ADXL202E 仕様の MEMS センサーであり、加速度レベルは±2g となっている。また、簡易無線計測システムは Master Unit と Slave Unit から構成され、Master Unit からは計測開始や終了信号を送り、Slave Unit が受信することで時刻同期を行う。計測データはそれぞれ各 Unit の SD メモリーカード(SD memory card)に格納されるため、電波障害等の影響を受けない。

**3.2 常時微動実験** 対象橋梁は、Fig.2に示す、橋長32.2m、幅員3.7mの歩道橋である。Fig.3に示すように2台の簡易無線計測システムを利用し、測点（スパン中央）を基準として、測点 ~ の5点を、シナリオ1~4の順に移動しながらそれぞれ約20分間の常時微動測定を行う。サンプリング周波数は100Hzである。また、計測位置は歩行者の通行を妨害しないように幅員端で行っており、ねじれ振動も計測されるため、幅員方向の別途の実験でねじれ固有振動数(1次：7.78Hz, 2次：12.85Hz)を確認している。参考として、シナリオ1における測点の加速度波形とフーリエ振幅スペクトルをFig.4に示す。

**4. 推定結果**

シナリオ1~4から得られた卓越振動数の推定結果を Fig.5 に示す。本研究で導入した簡易無線計測システムは80秒ずつデータを記録することから、15個のデータが存在するが、そのうち、大幅に推定値がずれているものがあったため、それらのデータを除いて推定結果をまとめることとする。また、各シナリオの2点のモード形を重ね合わせる<sup>3)</sup>ことで得られる、全橋梁のモード図を Fig.6 に示す。Fig.6から分かるように、測点の一次モード形が理論上の形状とは異なる結果となっている。これは、歩行者等の外力により、測点の計測を含むシナリオ3の計測時にねじれ振動が多くみられ、ねじれ振動の影響を受けていることが原因の一つであると考えられる。また、FFTにより得られた曲げ固有振動数と、多次元AR(MA)モデルにより得られたそれらの推定値を比較したものを Table 1 に示す。1次・2次ともに、固有振動数はほぼ一致していると言える。一方、減衰定数の推定結果も Table 1 に示しているが、その推定精度に関しては、今後RD法等、他の手法による結果との比較・検討を行う予定である。

**5. まとめ**

簡易無線計測システムを用いた常時微動実験から得られた測定データより、FFT と多次元 AR(MA)モデルによる振動数やモード形の比較・検討を行った。振動モードについては一致しない計測点はあるものの、曲げ1次・2次固有振動数、振動モードはほぼ一致している結果となった。減衰定数の精度の検討およびねじれの推定結果への影響を明確にする必要がある。それらの課題を解決すれば、簡易無線計測システムによるデータ計測、さらに多次元 AR(MA)モデルを用い橋梁振動特性の自動化を図ることで、より容易な振動モニタリングが可能であると考えられる。

**参考文献**

1) W. Doebling, C. R. Farrar, M. B. Prime, and D. W. Shevitz: Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review, Los Alamos National Laboratory report LA-13070-MS, 1996.  
 2) 郝 捷馨, 川谷 充郎, 金 哲佑, 多次元 ARMA モデルを用いた車両走行実験応答による橋梁振動特性の推定, 第 62 回土木学会年次講演会, 1-087, 2007  
 3) 宮下 剛, 二台の無線 LAN 加速度計による橋梁の振動モード同定, 土木学会第 61 回年次学術講演会, 1-496, 2006

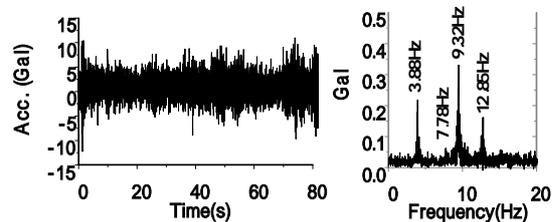


Fig. 4 Acceleration and Fourier spectrum of Measurement Point I of Scenario 1

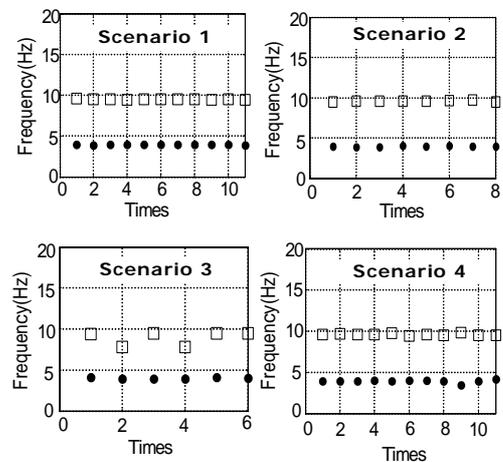
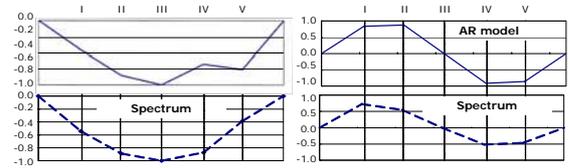


Fig.5 Estimated frequency of each scenario



(a) First bending mode (b) Second bending mode

Table 1 Summary of bending natural frequency and damping constant

	Frequency		Damping constant	
	1st	2nd	1st	2nd
FFT	3.86	9.40	-	-
AR model	3.97	9.39	0.034	0.046