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

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 長崎大学工学部 フェロー 岡林 隆敏 神戸大学大学院 学生員 〇郝 婕馨 神戸大学大学院 学生員 藤本 達貴

1.はじめに

高度経済成長期に整備された多くの橋梁構造物は供用後 50 年を迎えようとしている. これらの状況の中, 橋梁の現状性能を評価し適切な維持管理を行うことが重要な課題になっている. 通常, 構造物においては, 部材の損傷や劣化はその質量, 減衰や剛性等の材料特性, 固有振動数, 減衰比や振動モード等の動特性の変動として現れる. したがって, 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 いされている. これまで, 振動データ, 特に常時微動データより構造物の振動特性を推定する方法の一つとして, 多次元 ARMA モデルによる手法を提案 のしてきた. 本研究では, 中・小支間橋梁の車両走行のよる交通振動データから多次元 ARMA モデルによる橋梁振動特性推定の可能性を模型橋梁走行実験装置による実験データを用いて検討する.

2.多次元 ARMA モデルの構成

構造モデルの各節点に外力が作用する場合の運動方程式は次 式のように表される.

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

ここに、 \mathbf{M} , \mathbf{C} , \mathbf{K} は質量マトリクス、減衰マトリクス、剛性マトリクス、 $\mathbf{f}(t)$ は外力ベクトルである.

(1)式の可観測変換された状態方程式は次式のように表される.

$$\hat{\boldsymbol{x}}(k+1) = \hat{\boldsymbol{A}}\hat{\boldsymbol{x}}(k) + \hat{\boldsymbol{B}}f(k) \tag{2a}$$

$$\mathbf{v}(k) = \hat{\mathbf{C}}\hat{\mathbf{x}}(k) \tag{2b}$$

(1)式を多次元 ARMA モデルで表現すると,次式のようになる.

$$y(k) + \sum_{s=1}^{p} \mathbf{G}_{s} y(k-s) = \sum_{s=1}^{p} \mathbf{R}_{s} e(k-s)$$
 (3)

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次元 AR モデル(式(3)参照)として考える.

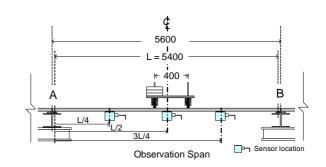
$$y(k) + \sum_{s=1}^{p} \mathbf{G}_{s} y(k-s) = e(k)$$
 (4)

観測値の分散・共分散行列は次式で与えられる.

$$\mathbf{G}(\mathbf{l}) = \frac{1}{N} \mathbf{y}(\mathbf{k}) \mathbf{y}^{\mathrm{T}}(\mathbf{k} - \mathbf{l}), \quad \mathbf{G}(-\mathbf{l}) = \frac{1}{N} \mathbf{y}(\mathbf{k}) \mathbf{y}^{\mathrm{T}}(\mathbf{k} + \mathbf{l})$$
 (5)

(4), (5)式より, Yule-Walker 方程式を行列表示すると, 次式になる.

$$\begin{bmatrix} G(0) & \cdots & G(p-1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G^{T}(N) & \cdots & G(N-p+1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_{1}^{T} \\ \vdots \\ G_{p}^{T} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} G^{T}(1) \\ \vdots \\ G^{T}(N+1) \end{bmatrix}$$
(6)



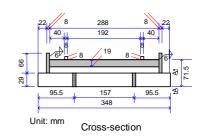


Fig. 1 Experimental girder

Table 1 Structural properties of bridge model

Span length(cm)	540		
Young's modulus(kgf/cm ²)	2.1x10 ⁻⁶		
Unit weight (kgf/cm ³)	7.8 x10 ⁻³		
Area of section(cm ²)	66.97		
Moment of inertia of Area (cm ⁴)	5.766 x10 ⁻³		

(6)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 $G_I \sim G_p$ が算出できる.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.

キーワード: 多次元 ARMA モデル, 橋梁交通振動, 振動特性推定, 模型橋梁走行実験

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 Fax: 078-803-6069

3.模型実験概要

模型桁と模型車両を利用し、車両走行による振動計測を行う. 実験に使用する模型桁は、Fig.1 で示すような H 型鋼桁である. 構造諸元を Table1 に掲げる. 実験に使用する模型車両は、振動特性の異なる 3 種類の模型車両 (V1(f=2.88Hz)、V2(f=3.17Hz)、

観測点として、模型桁の L/4, L/2, 3/4L の 3 点に加速度計を取り付け、時間間隔は 0.01 秒で計測する. 模型車両の走行速度は、支間長 40.4m、固有周期 0.42 秒の橋梁での 20km/h、40km/h に相当する 0.93m/s と 1.63m/s の 2 パタンとした. また、各走行速度で3 種類の車両で各 3 回、計 9 回計測する. 測定された加速度は時系列の例として、走行速度 0.93m/s の加速度波形を Fig.2 に示す. 模型車両が計測桁に入る時点から桁の振動がおさまるまでの計測データ(Fig.2 の破線間)を推定に用いる.

4. 振動特性の推定結果

V3(f=3.86Hz)) を使用する.

走行速度が 0.93m/s のときは 8 秒間のデータ,走行速度が 1.63m/s のとき 5 秒間のデータに基づいて推定を行い,多次元 ARMA モデルの次元は 3,モデル次数は p=12 の AR (3,12)で推定を行う.実測の場合は一般的には加速度計を使用するので,加速度データから振動特性推定を行う.

固有振動数の推定結果を **Table 2** に示す. 走行速度が 0.93m/s のとき,推定結果の変動係数に着目すると, 1次モードの場合は 3%であり, 2次と 3次モードでは 2%以下になることが分かる. 一方,走行速度が 1.63m/s の場合は低速実験の結果より変動係数 は大きくなる. その原因は計測データの数がより少なくなり,推 定精度が悪くなると考えられる. 特に,走行速度 v=1.63m/s の場

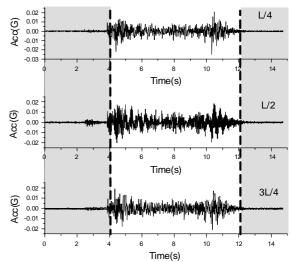


Fig. 2 Acceleration responses of bridge model from experiment (ν =0.93m/s V1 f=2.88HZ)

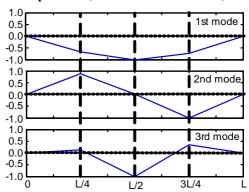


Fig. 3 Estimated mode shapes (ν =0.93m/s)

合,1次の振動数の推定精度は2

次および3次の結果と比べてかなり良くない結果になった.その原因として,走行速度に伴う車両の動的接地力の増加により,車両上下振動が橋梁の1次振動

Mode	Analysis	Estimated (Hz) $(v = 0.93 \text{m/s})$			Estimated (Hz) $(v = 1.63 \text{m/s})$		
	(Hz)	Mean	SD	CV(%)	Mean	SD	CV(%)
First	2.576	2.692	0.08134	3.021	3.408	0.9380	27.52
Second	10.23	9.558	0.1705	1.784	9.713	0.3136	3.229
Third	21.72	20.52	0.3870	1.886	21.69	1.916	8.834

Table 2 Estimated natural frequencies of bridge model

に及ぼす影響が大きくなったからと考えられる. 振動モードの推定結果を Fig.3 に示す. 1 次・2 次の振動モードは良好に推定できることが分かる.

5. まとめ

多次元 ARMA モデルを用いて車両走行振動より中・小支間橋梁を想定した模型桁の振動特性推定を行った. 交通振動は非定常性があるため、車両の上下振動と近い振動特性を持つ模型桁の振動特性の推定を多次元 ARMA モデルより推定するのは難しいと予測したが、今回の検討より本手法で推定が可能であることが確認できた. 今後は、本手法を適用し、損傷桁の振動特性推定および健全度評価に適用する予定である.

参考文献:1)S.W.Doebling,et al.: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-3070-MS,1996.

2)カク,岡林,中:多次元 ARMA モデルを用いた常時微動による橋梁振動特性推定法と推定精度の検討, 土木学会第61回年会,第 I 部門,2006. 9