

常時微動観測に基づく2段階推定法による橋梁の振動特性自動推定

長崎大学大学院 学生会員 ○房前慎一

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

長崎大学大学院 学生会員

船原祐樹

1. はじめに

橋梁に損傷・劣化が発生すると、局所的な剛性の低下が起こり、固有振動数に変化が生じる。しかしその変化は微細であるため、振動特性の変化から橋梁の健全度評価を行うためには、高精度な分解能を有する振動特性推定手法の開発が必要である。本研究は、AR モデルによる1段階推定¹⁾、ARMA モデルおよび自己相関関数曲線適合による2段階推定を用いて、橋梁の常時微動から振動特性を自動推定する構造同定手法を開発することを目的とし、実橋梁での常時微動データに基づいて、本手法の有効性の検証と推定精度の検討を行った。

2. 対象橋梁

対象橋梁は、長崎県の樺島大橋である。この橋梁は、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。図-1 に樺島大橋の全景を示し、図-2 に一般図と速度計の設置位置を示す。本研究では、桁の鉛直方向の振動を速度計により計測をする。AR モデルによる1段階推定では 0.01 秒毎に計 60 秒間分の応答データを1回区分として振動特性を推定する。



図-1 樺島大橋（長崎県）

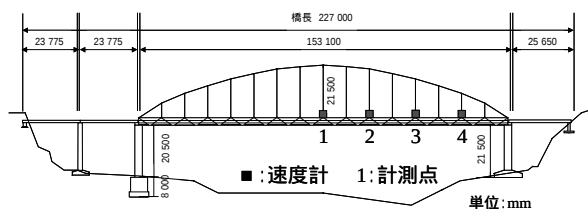


図-2 一般図と速度計の設置場所

2. 振動特性推定法

1) 振動特性推定法の流れ

振動特性推定法の流れは、常時微動より自己相関関数を算出し、AR モデルより振動数と減衰定数を推定する。次に多自由度系をバンドパスフィルタにより1自由度系へと還元する。分割された各振動次数の振動データに基づいて、ARMA モデルおよび自己相関関数曲線適合を用いて振動特性を再度推定する。振動特性推定法の流れを図-3 に示す。

2) 1段階推定（AR モデル）

運動方程式より AR モデルは次式のようになる。

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

この AR モデルの特性方程式と根の関係は、

$$z^n - a_1 z^{n-1} - a_2 z^{n-2} - \dots - a_n = 0, \quad z = X_{\text{Re}}^k \pm i X_{\text{Im}}^k \quad (2)$$

である。特性方程式の実部 X_{Re} と虚部 X_{Im} より、振動数と減衰定数を推定することができる。

$$h_k \omega_k = (-1/\Delta) \log \sqrt{X_{\text{Re}}^2 + X_{\text{Im}}^2}, \quad \omega_k \sqrt{1 - h_k^2} = (1/\Delta) \tan^{-1}(X_{\text{Im}} / X_{\text{Re}})$$

$$(\omega_k : \text{円振動数}, h_k : \text{減衰定数}, \Delta : \text{時間刻み}) \quad (3)$$

3) 2段階推定（ARMA モデル，自己相関関数曲線適合）

AR モデルにより推定された振動数を用いて、バンドパスフィルタの位置を自動的に設定する。バンドパス

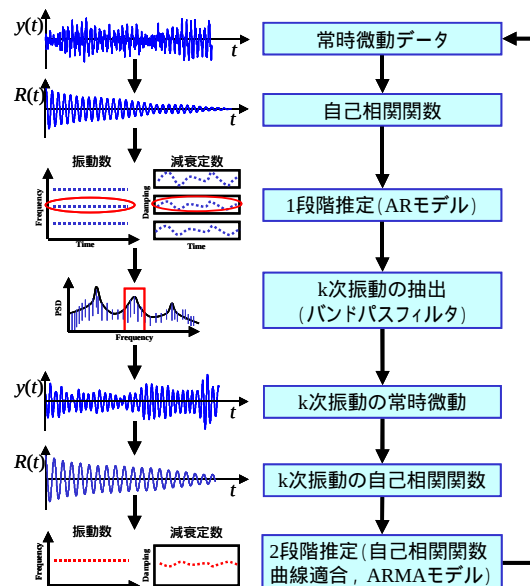


図-3 振動特性推定法の流れ

フィルタにより多自由度系を1自由度系に還元し、振動データを抽出する。抽出する振動データは20周期分とする。

・ARMAモデルは、次式を用いて振動数と減衰定数を推定する。

$$y(k) + a_1 y(k-1) + a_2 y(k-2) = e(k) + b_1 e(k-1) \quad (4)$$

・自己相関関数曲線適合では、ARモデルで得られた ω_k と h_k を初期値としてフィルタ処理後の自己相関関数に(5)式を曲線適合させる。

$$R_k = A_{k1} \exp(-h_{k1} \omega_{k1} t) \cos(\omega_{k1} \sqrt{1-h_{k1}^2} t + \theta_{k1})$$

(A_{k1} :振幅, θ_{k1} :位相のずれ) (5)

非線形最小二乗法より二乗誤差 ε_{kt} を最小にするような最適なパラメータを決定する。二乗誤差 ε_{kt} は、次式で表す。

$$\varepsilon_{kt} = \sum_{s=0}^{N-1} |\tilde{R}_k - R_k|^2 \quad (6)$$

4. 検証結果

ARMAモデルと自己相関関数曲線適合による2段階推定における振動数の推定軌跡を図-4に示す。2段階推定における振動数は、計測点1の2次、4次、5次振動、計測点4の1次、3次、6次振動を抽出し、振動数を重ねて表示したものである。図-2にARモデルによる1段階推定とARMAモデルによる2段階推定の減衰定数の1次から3次振動までの推定軌跡を示す。表-1には各手法における減衰定数の推定精度を示す。

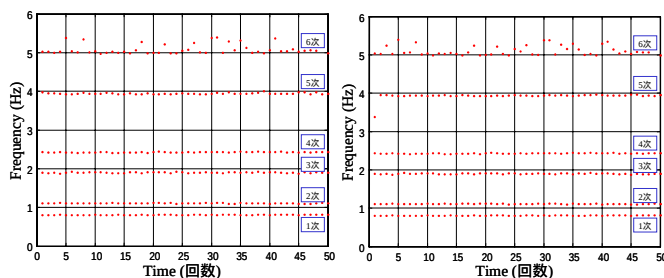
振動数は、各手法とも変動係数1%程度で推定することができているが、2段階推定を行うことでさらに変動を小さくすることができた。減衰定数ではARMAモデルによる2段階推定を実施すると、1段階推定に比べ、変動が小さくなり、明確な改善が認められる。自己相関関数曲線適合による2段階推定では、2次と5次振動において1段階推定と比較し、変動係数が大きくなる結果となった。

5. まとめ

本論文ではARモデルによる1段階推定法とARMAモデルと自己相関関数曲線適合による2段階推定法を開発し、実橋梁の常時微動を用いて検証を行った。本論文を要約すると以下ようになる。

- 1) 実橋の常時微動からARモデルによる1段階推定とARMAモデルと自己相関関数曲線適合による2段階推定により、振動数と減衰定数を推定した。
- 2) 振動数においては1段階推定と2段階推定の両者ともに、精度よく推定することができた。
- 3) 減衰定数では、1段階推定に比べ、ARMAモデルによる2段階推定を行うことで変動が小さくなることを確認できた。

[参考文献] 1) 中宮, 岡林, 奥松: 土木学会第57回年次学術回, 第 部門, pp1667~1668. 2002.9



a) 自己相関関数曲線適合 b) ARMAモデル

図-4 2段階推定による振動数

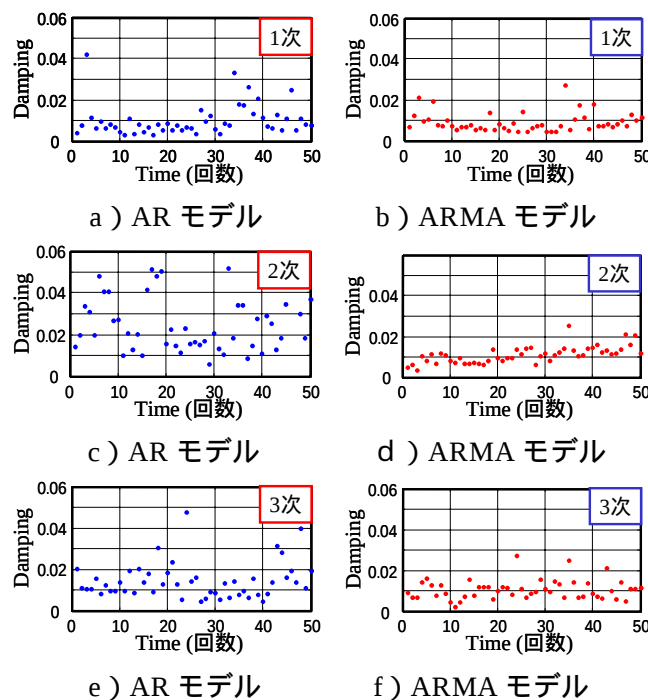


図-5 2段階推定による減衰定数

表-1 減衰定数の推定精度

		平均	標準偏差	変動係数(%)
1次	AR	0.0101	0.0078	76.86
	曲線適合	0.0097	0.0057	58.32
	ARMA	0.0090	0.0047	48.91
2次	AR	0.0254	0.0134	52.55
	曲線適合	0.0211	0.0155	73.16
	ARMA	0.0111	0.0042	19.73
3次	AR	0.0144	0.0088	60.95
	曲線適合	0.0126	0.0092	73.06
	ARMA	0.0106	0.0048	38.33
4次	AR	0.0107	0.0063	58.89
	曲線適合	0.0064	0.0032	49.61
	ARMA	0.0056	0.0030	47.62
5次	AR	0.0273	0.0167	61.26
	曲線適合	0.0249	0.0205	82.46
	ARMA	0.0066	0.0041	16.36
6次	AR	0.0229	0.0095	41.39
	曲線適合	0.0204	0.0079	38.87
	ARMA	0.0184	0.0087	42.81