

2 段階推定法を用いた橋梁振動特性自動推定システムによる実橋観測

長崎大学大学院 正 会 員○奥松俊博 長崎大学工学部 フェロー 岡林隆敏
 長崎大学大学院 学生会員 舩原祐樹 長崎大学大学院 学生会員 要谷貴則

1. はじめに

常時微動を入力情報として，振動特性の変化から構造物の健全度評価を行うためには，微細な振動特性の変化を高精度に推定できる解析手法の確立が必要となる．本研究では，AR モデルで推定された振動特性¹⁾をもとに，ARMA モデルと自己相関関数曲線適合より，さらに高精度に振動特性を同定することを目的とした．供用中の橋梁の常時微動観測データをもとに，本手法により振動特性を同定し，推定精度の比較により本手法の有効性について検証した．

2. 振動特性推定手法

1) 振動特性推定法

構造物の常時微動をもとに自己相関関数を算出し，AR モデルを適用することで固有振動数と減衰定数を同定する．これを 1 段階推定と称する．次にバンドパスフィルタにより多自由度系を 1 自由度系に分割する．抽出した各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．これを 2 段階推定と称する．この振動数推定の流れを図-1 に示す．以下に各段階の推定方法について記す．

2) 1 段階推定 (AR モデル)

多自由度系の運動方程式の AR モデルは式(1)で表される．その特性方程式と根は式(2)と式(3)で表される．

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

$$z^n - a_1 z^{n-1} - a_2 z^{n-2} - \dots - a_n = 0 \quad (2)$$

$$z = X_{\text{Re}}^k \pm i X_{\text{Im}}^k \quad (3)$$

特性方程式の根と固有振動数 ω_k と減衰定数 h_k の関係は式(4)および式(5)で表され，それぞれの振動特性が算出される．ここに Δ は時間刻みである．

$$h_k \omega_k = (-1/\Delta) \log \sqrt{X_{\text{Re}}^2 + X_{\text{Im}}^2} \quad (4)$$

$$\omega_k \sqrt{1-h_k^2} = (1/\Delta) \tan^{-1}(X_{\text{Im}}/X_{\text{Re}}) \quad (5)$$

3) 2 段階推定 (ARMA モデル・自己相関関数曲線適合)

AR モデルより同定された固有振動数をもとに，バンドパスフィルタの位置を設定する．バンドパスフィルタにより多自由度系を 1 自由度系に還元し，その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．2 段階推定では 20 周期分の振動データを ARMA モデルと自己相関関数曲線適合をそれぞれ適用して振動特性を同定する．ARMA モデルは次式で表される．

$$y(k) + a_1 y(k-1) + a_2 y(k-2) = e(k) + b_1 e(k-1) \quad (6)$$

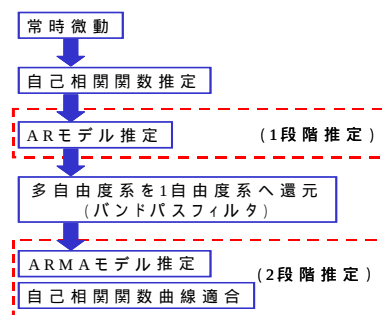


図-1 振動特性推定の流れ

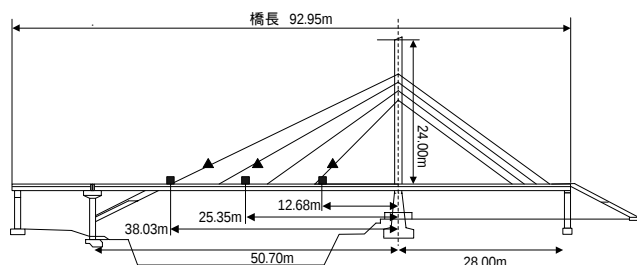


図-2 対象橋梁一般図



図-3 計測状況

キーワード 常時微動 構造同定 自己相関関数曲線適合 実橋観測

連絡先：長崎大学工学部（〒852-8521 長崎市文教町 1-14 TEL 095-819-2615）

また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 $\tilde{R}_k$ に式(7)を推定関数として曲線適合させる. ここに A_{k1} は振幅, θ_{k1} は位相のずれである.

$$R_k = A_{k1} \exp(-h_{k1} \omega_{k1} t) \sin(\omega_{k1} \sqrt{1-h_{k1}^2} t + \theta_{k1}) \quad (7)$$

さらに非線形最小二乗法より二乗誤差を最小にするような最適なパラメータを決定する.

3. 実橋計測

本解析手法を用いて, 2 径間連続鋼斜張橋である浦上川歩道橋(長崎市)の振動特性推定実験を実施した. 図-2 は対象橋梁の一般図と計測点を示したものである. 図-3 に計測状況を示す. 図-4(a)(b)に床版およびケーブルへのセンサー設置状況を, また図-5 に振動特性推定システムを示す. データサンプリング周波数は 100Hz として, 約 1 時間の常時微動計測を行なった.

4. 振動数推定結果

2 段階推定法を用いた振動特性推定結果のうち, 固有振動数の推定精度について検討する. 観測点 (図-2)で得られた床版鉛直方向の常時微動より 1 段階推定(AR モデル)で同定した固有振動数を示したのが図-6(a)である. 60 秒間に 1 回の割合で振動数を推定した(AR モデル次数: 100). 図-6(b)は観測点 で得られたケーブル振動の推定振動数を表したものである. (a)図の 2Hz 付近に表れた振動数はケーブル振動を検知したものと考えられる. 図-7(a)(b)は 3 次振動以下の 2 段階推定結果(ARMA モデル・曲線適合)を示したものである. また各推定手法により得られた 3 次以下の固有振動数を表-1 に示す. 1・2 次振動の標準偏差を比較すると, 2 段階推定により推定精度が向上していることが分かる. しかし 3 次振動では, 2 段階推定によって標準偏差が劣化した. フィルタの設定方法が原因と考えられる. 近接固有値が多く存在する高次振動領域では, バンドパスフィルタの設定方法について予め留意する必要がある.

5. まとめ

2 段階振動特性推定法を開発し, 実橋梁の振動計測に適用し, 振動数推定精度を向上できることを検証した. 近接固有値が存在する場合やデータの信頼性が低い場合, フィルタの設定方法について留意する必要がある. [参考文献]1) 岡林隆敏, 奥村俊博, 中宮義貴: 高精度自動振動数推定システムによる構造物損傷の検知に関する実験的研究, 構造工学論文集 Vol.51A, pp.479-490, 2005



(a)床版

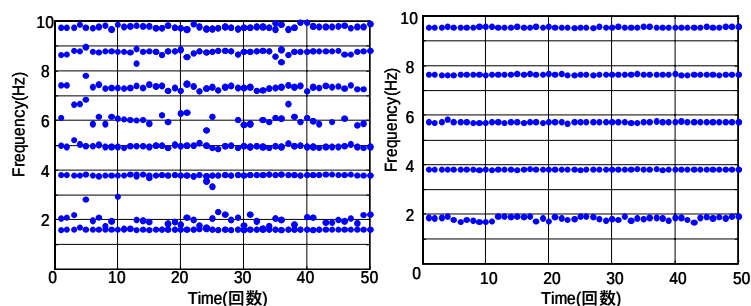


(b)ケーブル

図-4 加速度計設置状況

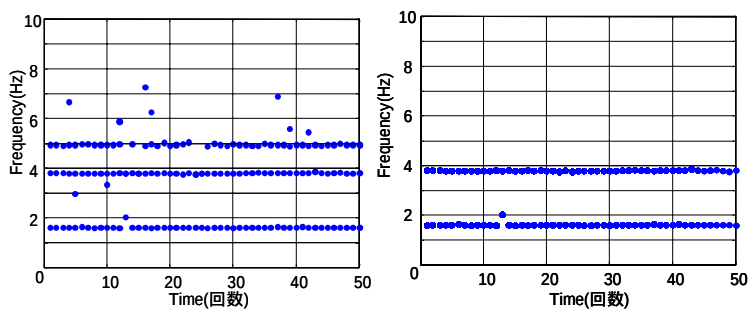


図-5 振動特性推定システム



(a)床版鉛直方向(観測点) (b)ケーブル軸直角方向(観測点)

図-6 固有振動数推定結果 (AR モデル)



(a) ARMA モデル

(b) 自己相関関数曲線適合

図-7 2 段階推定による固有振動数推定結果(1~3 次)

表-1 固有振動数推定結果

	1次			2次			3次		
	AR	ARMA	曲線適合	AR	ARMA	曲線適合	AR	ARMA	曲線適合
平均値(Hz)	1.605	1.612	1.611	3.940	3.942	3.781	5.065	5.031	N/A
標準偏差(Hz)	0.655	0.0574	0.0585	0.435	0.401	0.0186	0.017	0.647	N/A
変動係数(%)	40.84	3.559	3.633	11.04	10.17	0.4908	0.336	12.86	N/A