

2 段階推定法による 5 層構造物模型の振動特性推定

長崎大学工学部 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 房前慎一 長崎大学大学院 学生会員 船原祐樹

1. はじめに

構造物に損傷が発生すると振動数が変化（低下）することは知られている¹⁾。しかし構造物の規模は大きい場合、振動数低下は一般的に微小である。よって、振動数の変化から実構造物の健全度を評価するには、高精度な振動数推定を実現する必要がある。常時微動を白色雑音とみなし、AR モデルで構造物を表現し、構造物の動特性を推定する方法を試みた結果、損傷に伴う微小な振動数変化を高精度に推定することを確認している²⁾。本研究は、AR モデルにより同定した振動数を元に、ARMA モデルおよび曲線適合処理より 2 段階推定し、より高精度に振動特性を推定する方法を実験的に検証したものである。5 層構造物模型を対象に、常時微動観測による振動特性推定精度について評価を行った。

2. 振動特性の同定法

AR モデルによる振動数および減衰定数の推定を 1 段階推定¹⁾とする。1 段階推定で求められた各次の振動特性をもとに、バンドパスフィルタにより各次 1 自由度系に還元する。次に ARMA モデルおよび自己相関関数曲線適合処理を行い、振動特性を再度推定する。これを 2 段階推定と称する。各段階推定の構成式を以下に示す。

1) 1 段階推定 (AR モデル)

AR モデルは式(1)で表され、その特性方程式および特性方程式の根は、式(2)および(3)で表される。

$$y(k) + \sum_{s=1}^n a_s y(k-s) = e(k) \quad (1) \quad z^n - a_1 z^{n-1} - a_2 z^{n-2} - \dots - a_n = 0 \quad (2) \quad z = X_{\text{Re}}^k \pm i X_{\text{Im}}^k \quad (3)$$

特性方程式の実部 X_{Re} と虚部 X_{Im} より、式(4),(5)から振動数 ω_k と減衰定数 h_k を推定することができる。

$$h_k \omega_k = (-1/\Delta) \log \sqrt{X_{\text{Re}}^2 + X_{\text{Im}}^2} \quad (4) \quad \omega_k \sqrt{1 - h_k^2} = (1/\Delta) \tan^{-1}(X_{\text{Im}} / X_{\text{Re}}) \quad (5)$$

2) 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。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 段階推定では各次振動データより ARMA モデルと自己相関関数曲線適合により振動特性を推定する。ARMA モデルは式(6)で表され、これから振動特性が推定できる。

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

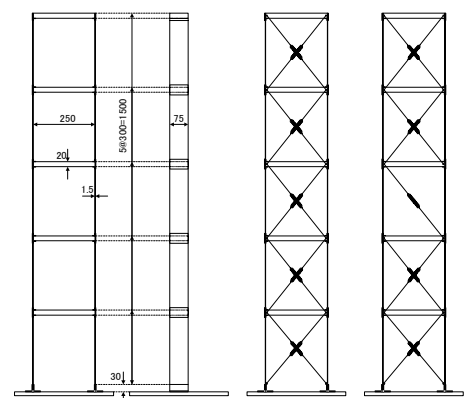
自己相関関数曲線適合では、AR モデルで得られた ω_k と h_k を初期値としてフィルタ処理後の自己相関関数に式(7)を曲線適合させる。ここに A_{k1} は振幅、 θ_{k1} は位相のずれを示す。

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

非線形最小二乗法より、式(8)の二乗誤差 ε_{kt} を最小にするような最適なパラメータを決定する。

$$\varepsilon_{kt} = \sum_{s=0}^{N-1} |\tilde{R}_k - R_k|^2 \quad (8)$$

$$R_k = B_{k1} \exp(-h_{k1} \omega_{k1} t) \cos(\omega_{k1} \sqrt{1 - h_{k1}^2} t + \theta_{k1}) + B_{k2} \exp(-h_{k2} \omega_{k2} t) \cos(\omega_{k2} \sqrt{1 - h_{k2}^2} t + \theta_{k2}) \quad (9)$$



a) 健全時 b) 損傷時

図-1 構造物模型 図-2 実験モデル

3. 対象構造物模型

(1) 構造物模型 アルミニウム製の5層構造物模型を対象に振動数推定を行う。構造物の概型を図-1に示した。各層間にブレースを配することにより、任意に固有振動数を変化させることができる構造とした。ブレースは、鋼線、ばね ($k=4.9\text{N/cm}$) より構成した。図-2はブレースを配した状態の設置した状態の構造物模型を模式的に示したものである。図-2 a)はブレースを全層設置した状態で、健全時を表す。図-2 b)は、中間層のブレース数1本を欠いたもので損傷時を表す。表-1にインパルス応答実験より得られた両ケースの固有振動数を表す。表中の変化率は各次の振動数変化分を健全時の振動数で除した値を表す。5次振動で約 0.07Hz の微小な振動数の変化があることが分かる。

(2) 実験・計測システム

図-3に実験システムを表す。PCで生成した白色雑音で振動台を加振し、このときに発生する構造物模型の不規則振動を構造物の常時微動と考える。構造物第4層で検知した加速度をデータサンプリング時間 $\Delta t=0.01$ (sec) でPCに取り込む。計測は、1データブロック30秒 ($\Delta t=0.01 \times 3000$ 個) として50ブロック (25分間) として、健全時と損傷時についてそれぞれ実施した。

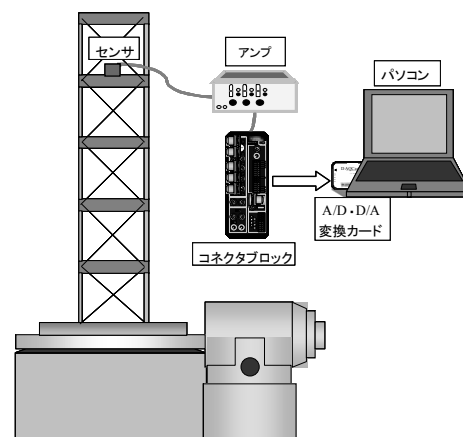


図-3 実験システム

4. 実験結果と考察

健全時および損傷時について、それぞれ1段階推定 (ARモデル)、2段階推定 (ARMAモデル、曲線適合) の振動数推定結果を表-2および表-3に示した。ここに、ARモデルの次数は $n=50$ としている。

(1) 2段階推定による振動数推定精度の検証

表-2および表-3より、2段階推定を施すことによって変動係数がより小さくなっている。また2段階推定により、各次の推定振動数は、表-1のインパルス応答結果に近づいている。このことは振動数推定精度が向上していることを示すものである。以上の結果から本手法が有効であることが確認できる。

(2) 微細振動数変化の検出

表-2および表-3において、2段階推定のうち、曲線適合の結果に着目して、損傷発生による振動数変化分の検出性能について検証する。振動数推定結果より、損傷により生じた振動数変化分は微小であることが分かる。比較的大きな低下を示した振動次数は5次および3次であるが、その振動数低下分 (低下率) は 0.068Hz (0.58%) および 0.019Hz (0.25%) ときわめて微小であることが分かる。室内実験の結果、本手法を適用することで微細な振動数の変化を検出できることが可能であることを検証することができた。この結果を踏まえ、本法を実橋の振動数推定に適用し、本手法の有効性について検証する。

[参考文献] 1) C.S.Huang: Structural Identification from Ambient Vibration Measurement using the Multivariate AR Model, Journal of Sound and Vibration, Vol.241(3), pp.337-359, 2001

2) 岡林隆敏, 奥松俊博, 中宮義貴: 常時微動に基づく AR モデルによる構造物振動数の高精度自動推定, 土木学会論文集 No.759/I-67, pp.271-282, 2004

表-1 固有振動数

次数	固有振動数(Hz)		振動数差	
	健全時	損傷時	変化分 (Hz)	変化率 (%)
1次	1.569	1.563	0.006	0.38
2次	4.877	4.858	0.019	0.39
3次	7.727	7.703	0.024	0.31
4次	10.132	10.126	0.006	0.06
5次	11.658	11.591	0.067	5.75

表-2 固有振動数 (健全時)

ARモデル		1次	2次	3次	4次	5次
	平均値(Hz)	1.618	4.850	7.764	10.134	11.664
ARMA	標準偏差(Hz)	0.0221	0.0118	0.0299	0.0146	0.0139
	変動係数(%)	1.364	0.243	0.385	0.144	0.119
	平均値(Hz)	1.584	4.862	7.714	10.139	11.656
曲線適合	標準偏差(Hz)	0.0128	0.0131	0.0100	0.0140	0.0144
	変動係数(%)	0.810	0.321	0.188	0.161	0.145
	平均値(Hz)	1.583	4.862	7.713	10.139	11.657
曲線適合	標準偏差(Hz)	0.0128	0.0131	0.0109	0.0140	0.0144
	変動係数(%)	0.810	0.322	0.196	0.164	0.147

表-3 固有振動数 (損傷時)

ARモデル		1次	2次	3次	4次	5次
	平均値(Hz)	1.617	4.840	7.744	10.122	11.596
ARMA	標準偏差(Hz)	0.0327	0.0120	0.0250	0.0115	0.0131
	変動係数(%)	2.019	0.249	0.323	0.113	0.113
	平均値(Hz)	1.583	4.855	7.699	10.128	11.591
曲線適合	標準偏差(Hz)	0.0113	0.0095	0.0098	0.0114	0.0134
	変動係数(%)	0.714	0.246	0.163	0.136	0.127
	平均値(Hz)	1.582	4.855	7.698	10.128	11.592
曲線適合	標準偏差(Hz)	0.0111	0.0095	0.0104	0.0114	0.0134
	変動係数(%)	0.704	0.245	0.169	0.138	0.129