

構造物損傷検知のための高精度振動特性推定法による実験的研究

長崎大学工学部 正 員 ○奥松俊博 長崎大学工学部 フェロー 岡林隆敏
NDD 正 員 中宮義貴 長崎大学大学院 学生員 木村啓作

1. はじめに

高度成長期に建設された多くの社会資本は耐用年数上の末期に入り、構造劣化・損傷が今後加速することが予想される。特に橋梁構造物は交通システム上重要な位置を占め、適切な維持管理を行うことが望ましい。一方、労働人口の減少などの社会的背景を考慮すると、効率的な維持管理業務を実現するための健全度評価技術を確立することが今後の課題と考える。一般に、構造物が劣化すると全体剛性が低下し、その結果固有振動数の低下へとつながる。しかし振動数の変動はごく微小であることが多い。そこで本研究では、高精度振動特性自動推定システム¹⁾を用いて、損傷構造物の振動特性の変化を検出することを目的とした。5層ラーメン構造物模型を用いた振動台実験により本システムの有効性を検証する。

2. 高精度振動特性推定システム

構造物に発生する振動は、構造物固有の振動と外乱による振動が混在している。その中から、構造物の振動数を検出するためには、振動の中から外乱成分を除去し構造物固有の振動数を抽出する必要がある。本研究ではARモデルを用いて構造同定を行った。ARモデルのパラメータを適切に設定することにより、構造物の応答から、構造物の固有振動数を高精度かつ自動的に推定することが可能となる。本システムの核となる構造同定エンジンでは、自己相関関数の算出、ARモデルの作成、スペクトル解析、複素固有値解析までの一連の計算を行う。以下の(1)式および(2)式は、ARモデルの特性方程式およびその根である。(2)式と振動パラメータとの関係は(3)式および(4)式で表され、複素固有値解析を行うことで固有円振動数 ω_k と減衰定数 h_k を算出することができる¹⁾。本研究では、固有振動数のみの推定を行った。

$$Z^n - \alpha_1 Z^{n-1} - \alpha_2 Z^{n-2} - \dots - \alpha_n = 0 \quad (1) \quad Z_k = X_{\text{Re}}^k \pm i X_{\text{Im}}^k \quad (2)$$

$$h_k \omega_k = (-1/\Delta) \ln \sqrt{X_{\text{Re}}^2 + X_{\text{Im}}^2} \quad (3) \quad \omega_k \sqrt{1 - h_k^2} = (1/\Delta) \tan^{-1}(X_{\text{Im}} / X_{\text{Re}}) \quad (4)$$

3. 構造物模型振動台実験

(1) 構造物模型 振動台実験で用いた構造物模型は図-1に示すような5層ラーメン構造である。その諸元を表-1に示す。構造物損傷によって生じる固有振動数の変動を確認するために、本実験では構造物模型の層間にブレースを設置する構造とした。任意にブレースを破断

させることにより、構造物の損傷発生を再現するものである。ブレースは、鋼線、ばね($k=0.5\text{kgf/cm}$)、および破断部分となるプラスチックストリングより構成した(写真-1)。図-2はブレースを設置した構造系を模式的に表したものである。図-2a)は全層にブレースを設置した構造系(ケース1)、図-2b)は中間層のブレースを1本欠いた構造系(ケース2)である。有限要素法により求めた両ケースの固有振動数を表-2に示す。

表-1 構造物諸元

構造	5層ラーメン
材質	アルミニウム
単位重量	27.5 kN/m ³
弾性係数	$7.0 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$

表-2 固有振動数

次数	固有振動数(Hz)	
	ケース1	ケース2
1次	1.694	1.654
2次	4.936	4.841
3次	7.758	7.662
4次	9.928	9.869
5次	11.29	11.27

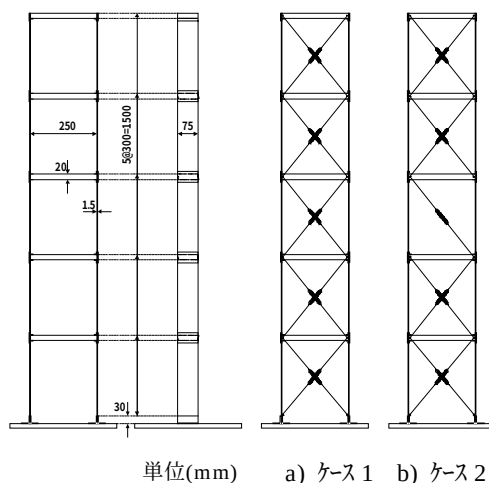


図-1 構造物模型

図-2 実験モデル

キーワード 橋梁振動, 構造同定, 健全度評価, 振動台実験, 維持管理

連絡先

〒852-8521 長崎市文教町1-14 長崎大学工学部社会開発工学科 TEL095-847-1111

(2) 実験概要 図-3に振動台実験の概要を表す。振動台に設置した構造物模型は、振動台を起振させることにより励起される。地震力として白色雑音を入力した。構造物模型の振動を加速度計で検出し、PC内の構造同定エンジンに取り込むことで、混在する振動数の中から、構造物の固有振動数を推定する。加速度計は振動モードを考慮して構造物第4層に設置した。計測サンプリング刻みは1/100秒である。ブレースの破断方法は、図-3中の変圧器により破断箇所を熱して切断する仕組みとした。破断箇所を写真-1に示す。計測時間は破断前後各15分とした。同定エンジンに基づき、パラメータを設定し振動数を自動推定した。30秒間に1回の割合で振動数を推定する。



写真-1 ブレース構造

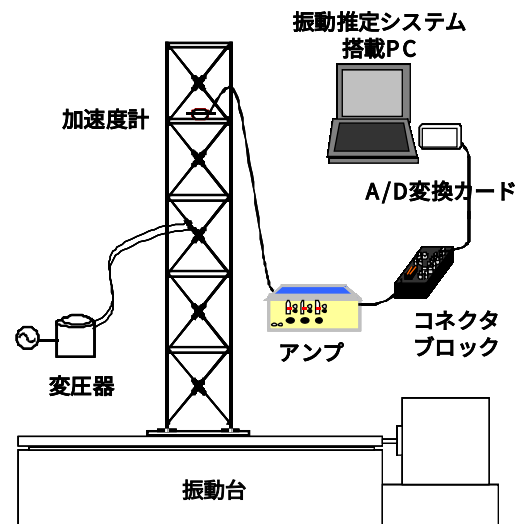


図-3 振動台実験概

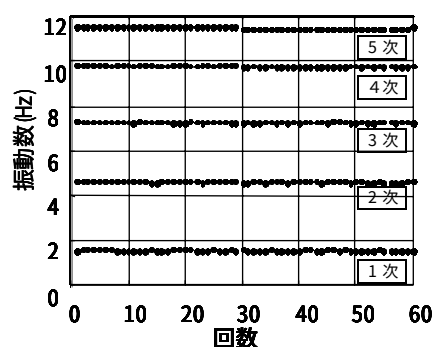


図-4 振動数推定結果

4. 実験結果と考察

構造物第4層で得られた加速度データを元に求めた推定振動数を図-4に示す。推定回数30回目でブレースを破断した。図-4中の4次および5次振動を抽出したものを図-5に示す。縦軸は振動数、横軸は推定回数である。ブレース破断前後の推定振動数の変動についてまとめたものを表-3に示す。破断とともに、4次および5次振動が顕著に低下しているが、その変動差は0.051Hz（変動率0.521%）、0.077Hz（同0.668%）と極めて小さいことが分かる。1～3次の低次振動への影響は少ないが、破断による振動数低下の傾向を検出している様子が確認できる。図-6は、1～5次推定振動数のガウス分布を、破断前、破断時、破断後に分けて表示したものである。顕著な振動数の低下が見られた4次および5次において、破断前後の分布形状が凸状であること、また破断とともに振動数の低い方にシフトしていることから、本システムが損傷に伴って発生する振動数の変動を、高精度に検出していることが分かる。

5. まとめ

構造物の損傷を考慮した振動台実験結果から、本推定法およびシステムによって、微小な振動数の変化を検出できることを確認した。さらに高精度に振動数推定を行うため、統計処理やフィルタリングの応用や、長期モニタリングを実施する予定である。最後に実験・研究に尽力した沖永泰知君（当時4年生）に対し謝意を表する。

[参考文献] 1) 中宮,岡林,奥松:ARモデルによる土木構造物の高精度振動特性推定法,土木学会第57回年次学術講演会,第I部門, pp.1667-1668(平成14年9月)

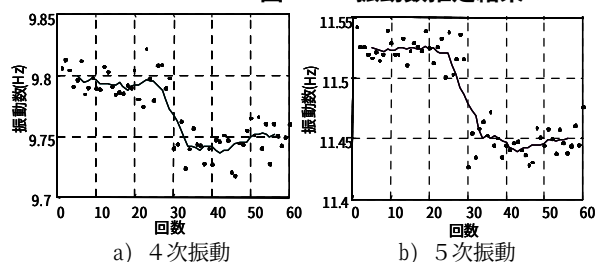


図-5 各次振動数推定結果

表-3 破断前後の推定振動数

次数	振動数 (Hz) 破断前	振動数 (Hz) 破断後	変動差 (Hz)	変動率 (%)
1次	1.578	1.574	0.004	0.253
2次	4.616	4.602	0.014	0.303
3次	7.275	7.269	0.006	0.082
4次	9.796	9.745	0.051	0.521
5次	11.524	11.447	0.077	0.668

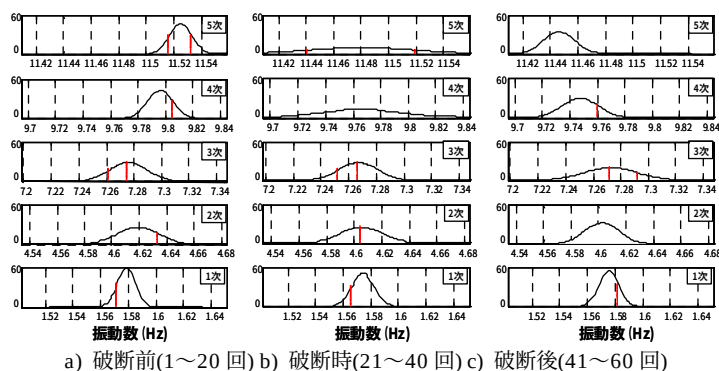


図-6 ガウス分布