

高精度振動数推定法による橋梁の損傷予測

長崎大学工学部 学生員 ○大岩根健吾
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 学生員 木村啓作

1. はじめに

振動数の変化から構造物の損傷を評価するために、微細な振動数の変化を精度よく検出できる高精度振動数推定法を開発した。本研究では、橋梁の部材が経時的に損傷するシミュレーションを行い、開発した高精度振動数推定法を用いて、振動数変化と損傷の関係を評価し、損傷予測の可能性について検証した。

2. シミュレーション概要

1) 対象橋梁

対象橋梁はランガー橋とし、平面骨組構造による構造モデルを図-1に示す。このモデルの諸元を表-1に、8次までの鉛直振動の固有振動数を表-2に示す。

2) 損傷モデル

本研究では、部材の損傷による振動数変化の検出を目的としているため、部材の損傷は、要素剛性マトリクス k_e を低下させることで表現した。損傷表現式は次式で定義する。なお、損傷させる部材は要素番号②とする。

$$\tilde{k}_e = g(t)k_e \quad (1)$$

$$g(t) = (1 - \alpha \frac{t}{n})$$

ここに、 $\tilde{k}_e$ は損傷発生時の要素剛性マトリクス、 $g(t)$ は損傷に伴う係数、 α は要素剛性の低下率、 t は時間、 n は損傷が発生してから総時間とし本研究では $\alpha = 0.6$ とする。 t と $g(t)$ の関係は、 $t < 0$ の区間で $g(t) = 1$ 、 $t > n$ の区間で $g(t) = 0.4$ となり、 $0 \leq t \leq n$ の区間で(1)式を適用する。また、これらの関係を図-2に示す。

3) 常時微動

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すことができる。

$$M\ddot{y}(t) + C\dot{y}(t) + Ky(t) = f(t) \quad (2)$$

ここに、 M, C, K はそれぞれ質量マトリクス、減衰マトリクス、剛性マトリクスであり、 $f(t)$ は外力ベクトルである。また、節点②～⑨の鉛直方向に独立な白色雑音を与えた場合の速度応答を常時微動とする。数値解析法には Newmark β 法を用いた。着目点を節点番号⑤とし、速度応答を常時微動とした場合の応答を図-3に示す。図-4は、この常時微動のMEMとFFTによるパワースペクトル密度である。

3. 高精度振動数特性推定法¹⁾

本研究では、橋梁の常時微動に基づいて振動数を推定するた

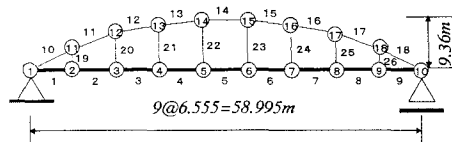


図-1 ランガー橋

表-1 モデル諸元 表-2 固有振動数

形式	補剛桁橋	次数	振動数(Hz)
支間長	$L(m)$	1次	1.742
ライズ	$f(m)$	2次	2.558
補剛桁の断面積	$A_f(m^2)$	3次	4.018
拱肋の断面積	$A_d(m^2)$	4次	6.355
曲げ剛性	$EI(kN \cdot m)$	5次	9.734
桁全重量	$W_f(kN)$	6次	13.616
換間数	9	7次	17.607
		8次	20.763

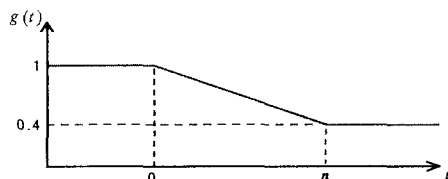


図-2 損傷に伴う剛性低下

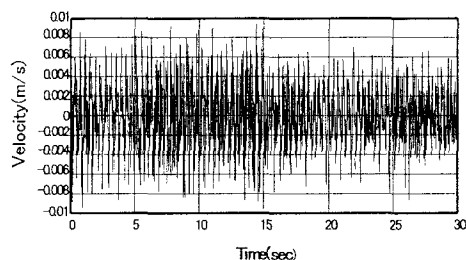


図-3 常時微動

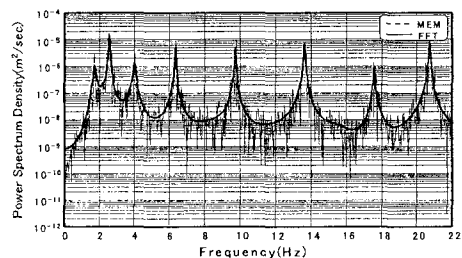


図-4 パワースペクトル密度

めに、AR モデルによる構造同定手法を用いる。AR モデルは、

$$y(k) + \sum_{s=1}^n a_s y(k-s) = e(k) \quad (3)$$

と表され、特性方程式と根の関係は、

$$Z^n - \alpha_1 Z^{n-1} - \alpha_2 Z^{n-2} - \dots - \alpha_n = 0, \quad Z_k = X_{\text{Re}}^k \pm iX_{\text{Im}}^k \quad (4)$$

である。特性方程式の実数部分 X_{Re} と虚数部分 X_{Im} 、サンプリング時間 Δ より次式から固有円振動数、減衰定数を推定できる。

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

4. 解析結果

1) 推定振動数の結果

振動数推定は、30 秒間の常時微動データを 1 回区分として 150 回行う。1～50 回目を健全時、51～100 回目を損傷発生中とし、要素剛性として(1)式を適用する。51～100 回目にかけては要素剛性の低下量は一定とし、100 回目の要素剛性を 0.4 としている。101～150 回目を損傷後とし、要素剛性は一定とする。着目点は節点番号⑤とする。合計 150 回の振動数推定軌跡を図-5 に示す。この結果から 1～8 次までの振動数を検出できていることが確認できる。

2) 損傷に伴う振動数変化の検出

健全時と損傷後の推定振動数の平均値と平均値の差である変化分を表-3 に示す。この表から各次数において損傷後の振動数低下が確認でき、その変化分はどの次数においても微小である。振動数変化を明確にするため、各次の移動平均を図-6 に示した。移動平均に着目してみると、特に 4 次、7 次において 51～100 回目における損傷に伴う振動数低下の過程が顕著に表れている。他の次数においても 1 次以外は振動数低下の過程を把握することができる。特に 5 次、6 次においては、その変化量は約 0.015Hz と極めて微小であるが、本手法によりこのような微小な変化も検出することが可能である。

5. まとめ

部材の剛性低下における微小な振動数の変化を、高精度振動数推定法により明確に検出できた。このことより、構造物の振動数変化における健全度評価の有効性を確認した。今後は、様々な損傷状態におけるシミュレーションや実測を行い、実用化することが課題であると考えられる。

[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 回年学術会, 第 I 部門, pp.1667～1668, 2002.9,

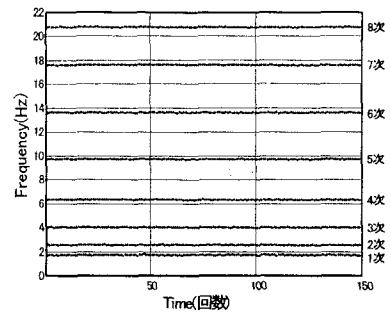


図-5 振動数推定軌跡

表-3 健全時・損傷後の振動数変化

振動次数	固有振動数 (Hz)		変化分 (Hz)
	健全時 (Hz)	損傷後 (Hz)	
1 次	1.729	1.715	0.014
2 次	2.573	2.548	0.025
3 次	4.032	4.003	0.029
4 次	6.352	6.328	0.024
5 次	9.737	9.720	0.017
6 次	13.608	13.593	0.015
7 次	17.588	17.548	0.040
8 次	20.737	20.717	0.020

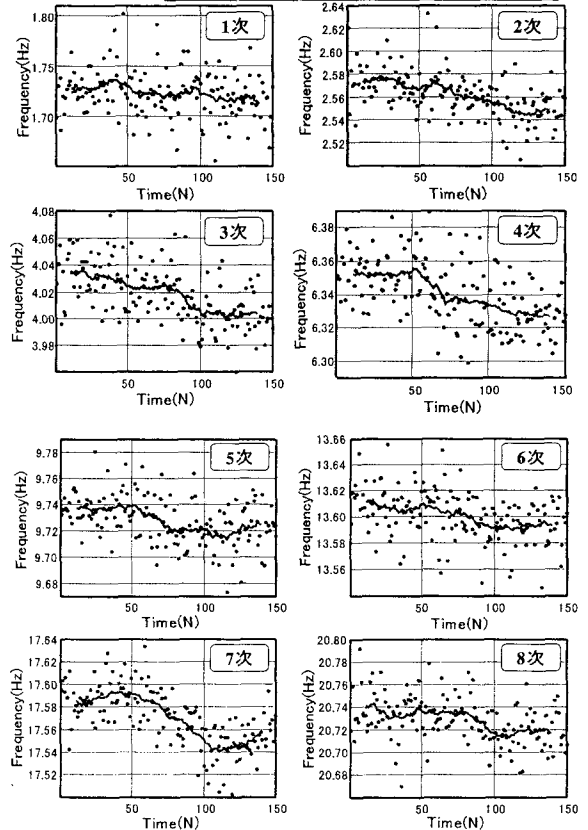


図-6 推定振動数の移動平均