

高精度振動特性推定法による道路橋損傷の検出可能性の検討

長崎大学大学院 学生員 ○木村啓作
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
NDD 正会員 中宮義貴

1.はじめに

構造物損傷の検出を，構造物の剛性の低下に伴う振動数の変化から検出する考え方は古くから提案されている．構造物の損傷に伴う振動数の変化は微小であるために，この技術を実現するためには，高精度の振動数分解能を有する振動数の検出法を開発する必要がある．本研究は，著者等が開発した高精度構造同定システム¹⁾より，ランガー橋の吊材の損傷を事例に，コンピュータシミュレーションにより振動数変化の検出の可能性を検討したものである．

2.シミュレーション概要

(1) 損傷表現

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．本研究では，部材の損傷による固有振動数変化の検出を目的とするため，部材の破断には要素剛性マトリクスを[0]として損傷を表現した．質量に関しては変化しないものとする．なお，破断する部材は要素番号20とし，破断のイメージについて図-2に示す．

(2) 常時微動

骨組構造によって離散化された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せる．

$$M\ddot{y}(t)+C\dot{y}(t)+Ky(t)=f(t)$$
(1)

ここに， M ， C ， K ($3n\times 3n$) は質量マトリクス，減衰マトリクス，剛性マトリクスであり， $f(t)$ ($3n\times 1$) は外力ベクトルである．常時微動は節点 10～13 の鉛直方向に独立な白色雑音を与えた場合の速度応答とする．数値解析法には Newmark β 法 ($\beta=1/4$) を用いた．着目点を節点番号 20 とした場合の常時微動を図-3に示す．図-4は，常時微動による MEM と FFT によるパワースペクトル密度である．

3.高精度振動特性推定法

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，

$$y(k)+\sum_{s=1}^na_sy(k-s)=e(k)$$
(2)

と表され，特性方程式と根の関係は，

$$Z^n-\alpha_1Z^{n-1}-\alpha_2Z^{n-2}-\cdots-\alpha_n=0, \quad Z_k=X_{\text{Re}}^k\pm iX_{\text{Im}}^k$$
(3)

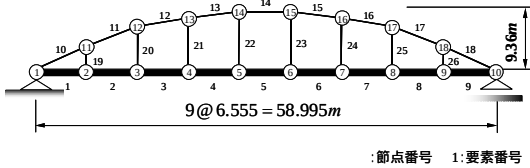


図-1 ランガー橋

表-1 モデル諸元 表-2 固有振動数

形式		補剛桁橋		固有振動数 (Hz)
支間長	$L(m)$	58.995	1次	1.742
ライズ	$f(m)$	9.36	2次	2.558
補剛桁の断面積	$A_1(m^2)$	2.24×10^{-2}	3次	4.018
拱肋の断面積	$A_2(m^2)$	1.23×10^{-2}	4次	6.355
曲げ剛性	$EI(kN \cdot m)$	1.74×10^4	5次	9.734
桁全重量	$W(kN)$	1.47×10^3	6次	13.616
格間数		9	7次	17.607
			8次	20.763

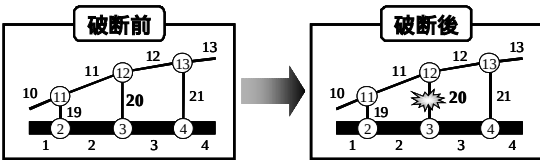


図-2 部材破断イメージ

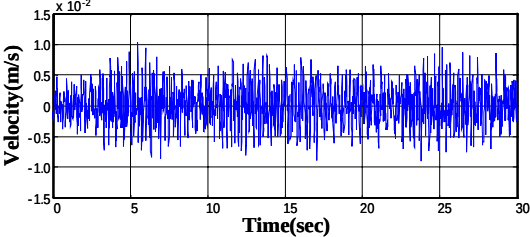


図-3 常時微動（速度応答）

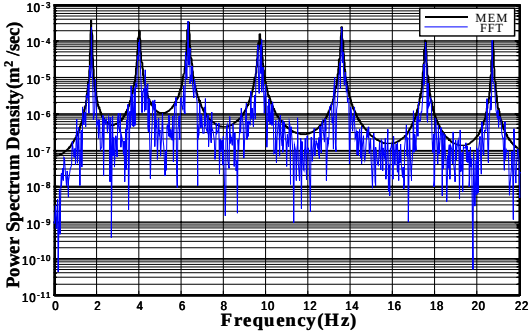


図-4 パワースペクトル密度

キーワード：橋梁振動，構造同定，健全度評価，常時微動，維持管理
連絡先：長崎大学工学部(〒852-8521 長崎市文教町 1-14，Tel 095-847-1111，Fax 095-848-3628)

である．特性方程式の実数部分 X_{Re} と虚数部分 X_{Im} より次式から固有円振動数，減衰定数を推定できる．

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

(4)

ここに， Δ はサンプリング時間である．

複素平面上において，根の絶対値 r_c ，角度 θ_c は(4)式より円振動数 ω_c ，減衰定数 h_c ，サンプリング時間 Δ を用いて，

$$r_c = e^{-h_c \omega_c \Delta} \quad , \quad \theta_c = \sqrt{1-h_c^2} \omega_c \Delta$$

(5)

となる．この ω_c ， h_c を上限とし，構造系固有値を抽出して振動数を推定する．

4. 解析結果

振動数推定には，30秒間の常時微動データを1回区分として100回行い，51回目に部材を損傷させた．着目点は節点番号とする．ARモデルにより得られた固有値から，構造系固有値を抽出した結果を図-5に示す．集中した固有値が構造系固有値，ばらついてゐる固有値が外乱系固有値であると考えられるが，設定した上限によって明確に分離できている．抽出した構造系固有値から得られた振動数推定軌跡が図-6である．縦軸は振動数（Hz），横軸は推定回数を表す．表-3に，破断前後の振動数の変化を示した．なお，2次の振動数は着目点を節点番号として推定した．2次～8次振動の変化より，損傷の可能性を判定できる．変動量の比較的小さい5次および8次に着目し振動数軌跡と移動平均を図-7に示す．移動平均から，5次，8次ともに破断後において振動数の低下が明確に把握できる．特に5次においては振動数の変動量が0.032Hzである．この値は振動数の変動量としては小さいが，本論文で用いた高精度構造同定システムにより検出が可能である．振動数推定の精度を調べるため破断前，破断後の Gauss 分布を図-8に示す．Gauss 分布の形状が凸状を示していること，破断後の振動数の低下が容易に確認できることから，損傷に伴う振動数の低下を精度よく検出できていることが分かる．

5. まとめ

道路橋部材の損傷を考慮した常時微動シミュレーションから，高精度振動特性推定法により振動数の変化を明確に検出できた．このことより，構造物の振動特性変化に着目した健全度評価方法の有効性を検証した．今後は，様々な損傷状態を考慮したシミュレーションと実測を行い実用化への検討が必要と考えている．

[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 部門，pp.1667～1668（平成14年9月）

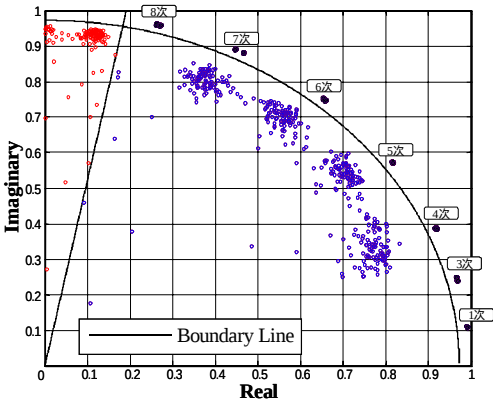


図-5 構造系固有値の抽出

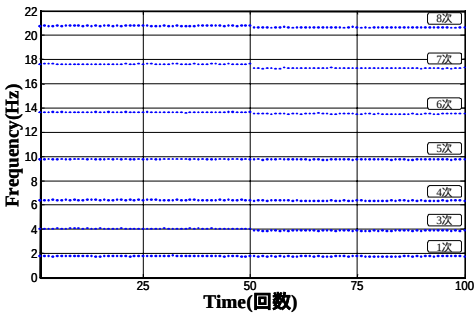


図-6 振動数推定軌跡

表-3 破断前後の振動数推定結果

次 数	破 断 前 (H z)	破 断 後 (H z)	変 動 量 (H z)
1 次	1.748	1.735	0.013
2 次	2.497	2.254	0.243
3 次	4.014	3.844	0.170
4 次	6.363	6.320	0.043
5 次	9.735	9.703	0.032
6 次	13.608	13.486	0.122
7 次	17.593	17.245	0.348
8 次	20.743	20.610	0.133

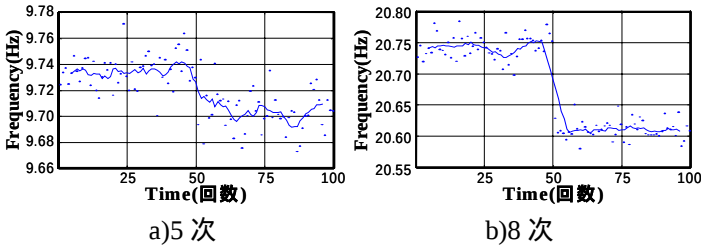


図-7 振動数推定軌跡と移動平均

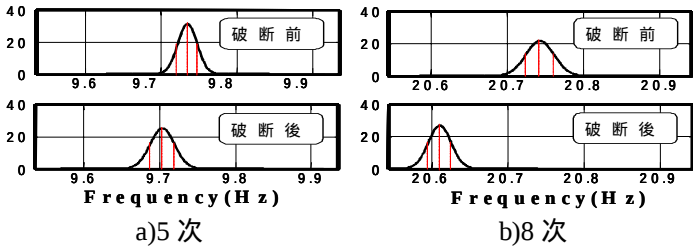


図-8 破断前後の Gauss 分布