

構造物の常時微動計測と減衰変化同定の精緻化に基づく健全度評価

Structural health monitoring based on measurement of ambient vibration and improvement of damping identification

プロジェクト代表者：山 口 宏 樹（理工学研究科・教授）

Hiroki Yamaguchi, Professor, Graduate School of Science and Engineering

1. はじめに

振動特性変化に基づく構造健全度評価は、可能であれば、固有振動数、減衰比、モード形状を総合的に用いて行う必要がある。しかし、この中の構造減衰については同定の不安定性やメカニズムの複雑さ等、未だに課題が多く残っている。そこで、本研究ではRD・ERA法に、Bootstrap法による統計的評価を加えた方法を適用し、数値シミュレーションによって同定方法の精度の検討した上で、RC造10層建物（H 44.5 m, B 32×24.3 m）とPC箱桁3径間連続橋（計測対象とした側径間部分約60 m）の2つの構造物の常時微動を計測、その常時微動データを用いてノイズの大きいデータに対する有効性の検討を行って、減衰同定の精緻化を試みた。

2. 常時微動データに基づく減衰同定方法

ERAは、構造物システムを表す数学モデルの特性行列を決定する方法であり、比較的高精度な同定法として用いられてきた。入力データとして自由振動波形を用いるため、常時微動波形から自由振動波形を精度良く抽出する必要性が生じ、本研究ではRD法を用いている。つまり、外力を平均値0の理想的なランダム外力と仮定し、応答を時間軸上で、閾値などの条件によって抽出して多数重ね合わせることで、ランダム応答成分を除去した自由振動波形を得た。また、ERA解析により同定される固有振動数は Stabilization Diagram や MAC などの指標を用いて安定した同定が可能であるが、減衰についてはばらつく場合が多く、1回の解析によって同定値を決定するのは難しい。そこで、リサンプリング手法であるBootstrap法を併用することとし、常時微動データからRD法によって得られた応答を無作為抽出して重ね合わせ、1つのデータから複数の自由振動波形を得てERA解析を繰り返すことで、減衰同定における不確実性を考慮した、統計的評価を行った。

3. 数値シミュレーションによる検証

1自由度系モデル（固有振動数 1 Hz, 減衰比0.01）に外力として白色雑音を仮定し、Newmark 法によってシミュレートした速度応答に対して、減衰と固有振動数の同定を行い、精度を比較した。図1に結果を示したが、Bootstrap分布の形状が固有振動数に比べ減衰のほうがばらついており、真の値を与えた場合でも、減衰同定が難しいことが統計的に示されている。

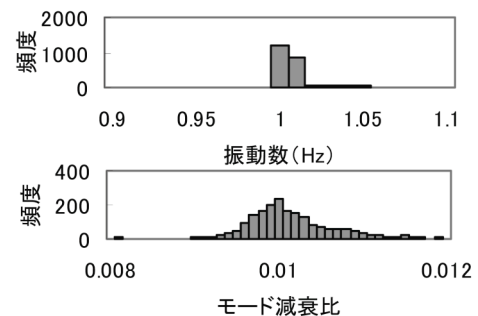


図1 振動特性によるBootstrap分布

4. 実構造物での常時微動計測と減衰同定

(1) 計測概要 層状建物では屋上階段部分に計測器を設置し、水平・鉛直方向速度成分を計測した（図2(a)）。計測時間は1回30分で計2回行っている。一方、橋梁では箱桁内部の4点（橋梁端部から橋軸方向2 m, 22 mの位置に各2個）に速度計を設置し、鉛直方向速度成分を計測した（図2(b)）。計測時間は1回30分で計6回である。サンプリング周波数は各200 Hzである。なお、常時微動の要因は、層状建物では主に風と地盤動、橋梁では走行車両である。

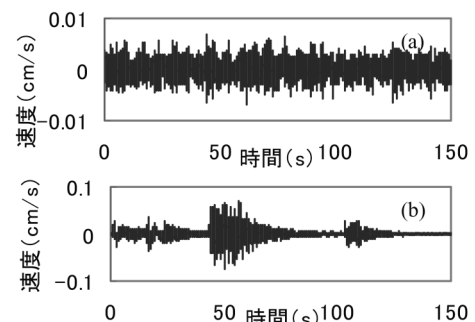


図2 時系列データ；(a)層状建物 (b)橋梁

(2) 同定結果 層状建物では単点ERA解析, 橋梁では多点ERA解析を行い, 同定された固有振動数と減衰比の関係を図3に示した. 両構造物とも固有振動数は安定して同定がされたが, 減衰についてはばらついていることが分かる. 次に, 図4に, Bootstrap法により200回同定を繰り返し得られた1次モード減衰比のBootstrap分布図を示す. それぞれ, RD法において閾値を0以上とした場合 (Case 1), 標準偏差の0.8倍以上とした場合 (Case 2) で解析を行ったが, 閾値の大きいCase 2ではピークが明確になっており, ノイズの影響が少なくなった為と考えられる. また, 層状建物に比べ橋梁では振幅レベルが大きいためにノイズの影響が小さく, 同じ条件では橋梁の方が比較的安定した減衰同定がなされている. しかし, 橋梁ではピーク位置が変化しており, 振幅を制限することで減衰のばらつきだけでなく, 同定値にも影響が及んでいる.

(3) 減衰の振幅依存性 橋梁の常時微動データに対し, 振幅をランクに分けた上でRD法を適用, 減衰の振幅依存性について検討した. RD法によって得られた各ランクの自由振動波形の初期値を振幅値とし, 振幅に対して固有振動数, 減衰比の同定値をプロットした (図5). 図より, 減衰は固有振動数に比べ振幅依存性が明確に表れること, モードによって振幅依存性の傾向が異なり, 減衰がモードに大きく依存する場合のあることが分かる. さらに, 1回の同定における不確実性を考慮して, 新たに設定した2つのランク, 振幅レベルを制限しない全ランクの3つの場合についてBootstrap法を適用した. 図6にその結果を示したが, これより, ノイズの影響が小さいと思われる大振幅に対する結果の方がばらつきが少ないこと, 振幅レベルを指定しない全ランクに対する減衰同定値は広くばらつき, 各2つのランクの中間になだらかなピークを持つことが分かる. なお, モードによって傾向は異なり, 1次モードでは振幅レベルの増加に伴い減衰値が減少するのに対し, 2次モードでは逆の傾向が見られる.

5. 結論

RD・ERA法に, Bootstrap法による統計的評価を行うことで, 1回の減衰同定における不確実性を考慮した減衰同定が可能であることを示した. また, 減衰は振幅によってばらつきの大きさだけでなく値自体も変化するため, 振幅レベルを考慮した減衰同定が構造健全度評価には重要となり得ること, モードによって減衰の振幅依存性が異なることから減衰のモード依存性にも配慮すべきであることが明らかとなった.

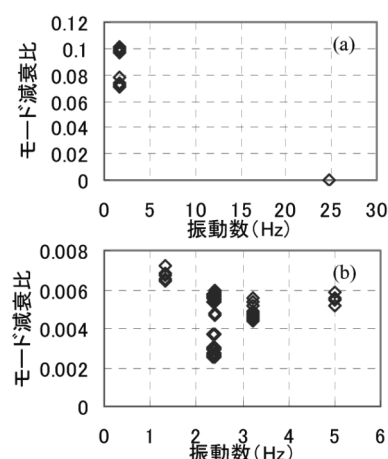


図3 モード減衰比と固有振動数の関係;
(a) 層状建物, (b) 橋梁

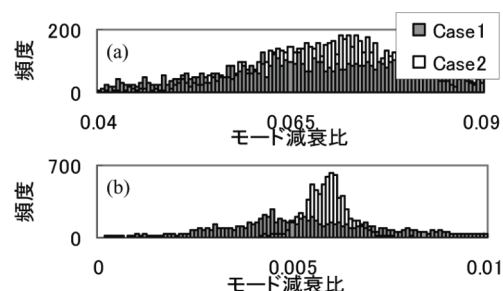


図4 減衰のBootstrap分布の比較;
(a) 層状建物, (b) 橋梁

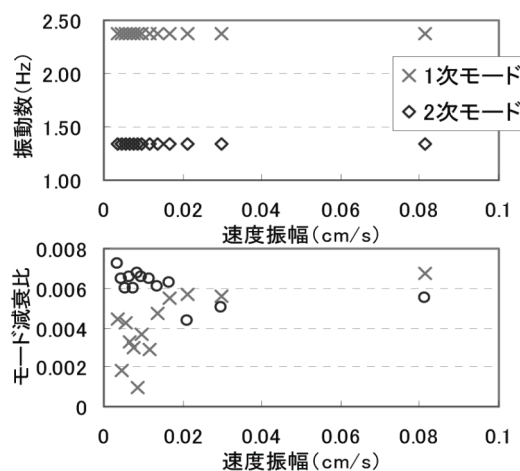


図5 振幅による同定値の変化

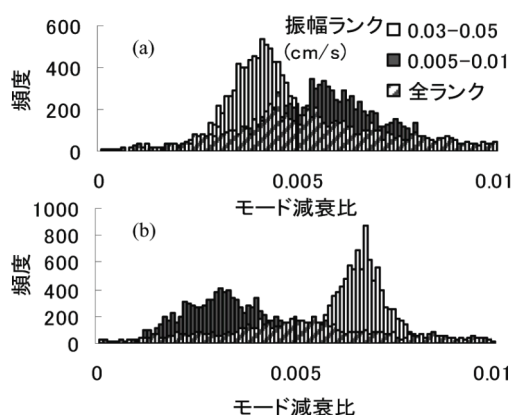


図6 ランク別のBootstrap分布;
(a) 1次モード, (b) 2次モード