

オペレーショナルモード解析における入力および計算条件と推定精度に関する考察

長崎大学大学院 学生会員○柴田剛志 長崎大学大学院 正会員 西川貴文
長崎大学大学院 正会員 中村聖三 長崎大学大学院 正会員 奥松俊博

1.はじめに

現在、対象構造物の振動状況の把握や振動特性の同定を目的とした振動モニタリングでは、供用環境における構造物の動的応答のみを用いて、構造同定手法によって振動特性の推定を行う実稼働モード推定が主流になりつつある．例えば、実現理論にもとづいた ERA（Eigensystem Realization Algorithm）や部分空間法による確率的部分空間法（SSI：Stochastic Subspace Identification）などによって、供用中の常時微動や交通振動から固有振動数、モード形および減衰定数を推定する．一般に、これら構造特性の同定計算では、各手法における複数の重要な計算パラメータを決定する必要がある．著者らは、これまでに橋梁モデルの解析応答を用いて計算条件の変化に対する同定計算の精度と安定性の変化に関して検討を行った．本研究では、さらに実橋計測を行い、実応答を用いて計算条件と推定結果に関する考察を行った．

2.対象橋梁と計測概要

本研究では、図 1 に示す長崎県内に位置する鋼ランガー橋（橋梁延長：115.0m、架設年次：1980 年）について、有限要素応答解析と常時微動および交通振動計測を行った．計測では鉛直加速度を対象とし、図 2 に示す位置に 6 箇所設置した．サンプリングレートは 1000Hz とし、ダウンサンプリングによって任意の時間分解能に設定することとした．

3. 初期モデル次数の影響

ERA および ERA/DC における共分散ブロック行列と SSI におけるデータブロック行列の行ブロック数は、対象の状態空間モデルのモデル次数に相当する最も重要なパラメータの一つで、初期モデル次数と呼ばれる．初期モデル次数は、理論的には、同定する対象構造モデルのモデル次数 n に対して少なくとも $2n$ とする必要があるが、実際においては、ノイズの影響などを考慮して、大きめに定める必要がある．経験的には、想定する状態モデル次数の数倍から場合によっては 10 倍以上とする必要があるとされている．本項では、各手法において初期モデル次数が推定結果におよぼす影響を定量的に評価する．ERA および ERA/DC のパラメータ検討条件をそれぞれ表 1、表 2 に示す．

4. SSI の応用法の提案



図 1 対象橋梁の概観

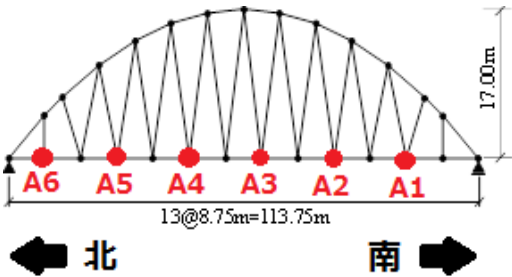


図 2 FE はりモデルと計測機器設置位置

表 1 ERA のパラメータ検討条件 (初期モデル次数)

項目	設定値
初期モデル次数	1～20
応答	桁上全節点の鉛直成分
サンプリング速度 [sample/s.]	100
データセグメント長	3,000 (30s.)
相関長さ	200
特異ベクトル長	24

表 2 ERA/DC のパラメータ検討条件 (モデル次数)

項目	設定値
第一モデル次数	1～10
第二モデル次数	1～3
応答点（計測点）	桁上全節点の鉛直成分
サンプリング速度	100
データセグメント長	3,000
第一相関長さ	200
第二相関長さ	1
相関ブロック行列間隔	1
特異ベクトル長	24

キーワード：構造同定，実稼働モード推定，モデル次数決定

連絡先：〒852-8521 長崎県長崎市文教町 1-14 長崎大学大学院工学研究科 Tel：095-819-2615

実稼働モード推定は、構造物の出力のみによって振動特性を推定する手法であり、橋梁などの社会基盤構造物を対象とした場合には、常時微動や交通振動などが用いられるが、十分に励起されていない場合に精度が低下するなど、応答レベルによって推定精度にばらつきが生じる。部分空間法による状態推定では、ある時刻における過去と未来の一定長の時系列データを用いて、前進と後進の2方向の推定が可能である。そこで著者らは、同一データを用いて前進と後進の双方向の状態推定を行い、その結果を平均化して推定結果を得ることで推定結果のばらつきを抑制する SSI の応用法を提案した。提案された推定手法では、全身 SSI による推定振動数 ω_k^f と推定減衰定数 h_k^f と後進 SSI による推定値 ω_k^b 、 h_k^b を用いて次のように推定結果を得る。

$$\begin{aligned}\omega_k &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\omega_{k,i}^f + \omega_{k,i}^b}{2} \\ h_k &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{h_{k,i}^f + h_{k,i}^b}{2}\end{aligned}\quad (1)$$

ここで、 N は任意の同定計算回数で、任意時間をデータセグメント長の相当時間で除した商に相当する。

5.観測ノイズの影響

応答の励起状態と含まれる観測ノイズレベルによって推定結果は大きく変動する。ここでは、観測ノイズが推定結果におよぼす影響を分析し、各同定手法の耐ノイズ性を評価する観点で考察する。

応答レベルの 0%から 50%相当まで段階的に観測ノイズを重畳した応答を用い、各手法における振動数および減衰定数の推定を行った。例として、ノイズレベル 30%の応答を用いた各手法による振動数の推定結果を図 3 に示す。ノイズの影響は、ERA および ERA/DC において、図 3(a)および同図(b)に示すように、推定結果の信頼性を定量的に示す MAC (Modal Assurance Criterion) の低下に表れている。特に、高次側の推定結果において影響が大きくなることがわかる。ノイズの影響の大きさを後述する変動係数の変化で評価すると、ERA と ERA/DC ではノイズレベルの増大にしたがって変動が顕著に大きくなった。また、ERA/DC においては、ノイズが含まれないケースよりも第 1 および第 2 相関パラメータを大きめに設定すると、計測ノイズの影響を少なからず低減できることがわかった。

一方で、SSI はノイズの影響が他手法と比較して小さいことを確認した。SSI は他の 2 手法よりも耐ノイズ性に優れたロバストな同定手法であるといえる。

6.実橋応答を用いた検証

各手法で実橋計測データの同定計算を行い、標準ケースと比較して計測・計算条件の優位性を検証した。常時計測による構造特性の監視にもとづく損傷検知を想定するような実稼働モード同定においては、同定結果の変動と特性の変化を分離することが必須であり、その点で計算条件の優位性が認められた。同定計算の安定性に関しては、モード検出率にいずれの手法においても明らかな向上が認められた。

7.まとめ

本研究では実稼働モード推定手法の実用的な確立に向けて解析的な試行によって、計測・計算条件に対応する各パラメータの同定精度におよぼす影響を定量的に検証し、対象モデルに対する最適な構造同定条件を定め、さらに、対象橋梁における実測データに適用した。実測データによる同定計算の結果、シミュレーション応答にもとづいて定めた計測・計算条件が実構造物に対しても有効であることを確認した。

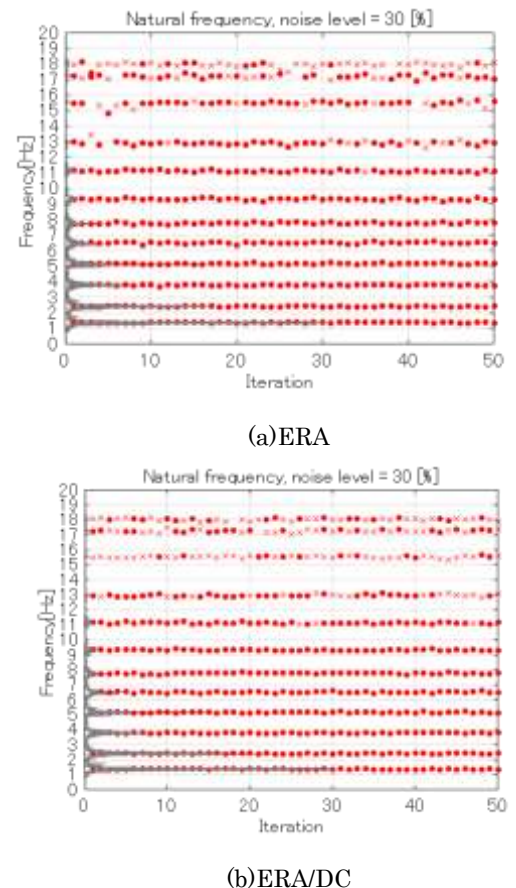


図 3 ノイズレベル 30%重畳応答に対する振動数推定結果 (×印は MAC<0.8)