

I - A248

逆解析手法を用いた構造物の損傷検出

大林組 正会員 菊川雅士
京都大学防災研究所 正会員 佐藤忠信

1. 概説

構造物はその耐用期間中に、コンクリートの腐食や鉄の発錆といった化学的変質や、地震や風等の自然外力による構造的な損傷を生ずる。近年、既存構造物を有効に利用しようという気運が高まっており、構造物の健全性をより長く維持するために、構造物の損傷評価を含む診断技術が必要とされている。こうした点を考慮し、適応型カルマンフィルターを用いて、構造物が地震動入力中に損傷を生じた場合を想定し、地震動および応答の観測データから、その損傷箇所を同定する手法を提案し、その際に問題となる観測点数とその配置について検討する。また、固定された観測点から得られるデータから、赤池ベイズ情報量基準(ABIC)を用いて損傷箇所および程度を同定する手法、および部分構造化により損傷箇所を絞り込む方法を提案する。

2. 適応型カルマンフィルターを用いた損傷同定

2.1 適応型カルマンフィルター

解析に用いる適応型カルマンフィルターについて簡単に紹介する。まず、対象とする構造系を線形の状態空間モデルで表現する。

$$\mathbf{x}_t = \Phi_{t-1} \mathbf{x}_{t-1} + \Gamma_{t-1} \mathbf{w}_{t-1} \quad (2-1)$$

$\mathbf{x}_t$: 構造物の状態量ベクトル

Φ_t : システム遷移行列

Γ_t : 既知の行列

$\mathbf{w}_t$: システムノイズベクトル

観測値 y_t を得る前に、時刻 t の状態量および事前推定誤差共分散を予測し、カルマンゲインを求める。
(λ_t : 忘却係数)

$$\hat{\mathbf{x}}_t = \Phi_{t-1} \hat{\mathbf{x}}_{t-1} + \Gamma_{t-1} \hat{\mathbf{w}}_{t-1} \quad (2-2)$$

$$\mathbf{M}_t = \Phi_{t-1} \mathbf{P}_{t-1} \Phi_{t-1}^T + \Gamma_{t-1} \mathbf{Q}_{t-1} \Gamma_{t-1}^T \quad (2-3)$$

$$\mathbf{K}_t = (\lambda_t \mathbf{M}_t^{-1} + \mathbf{H}_t^T \mathbf{R}_t^{-1} \mathbf{H}_t)^{-1} \mathbf{H}_t^T \mathbf{R}_t^{-1} \quad (2-4)$$

観測量を用いて状態量の最尤推定値および推定誤差

共分散を求める。

$$\mathbf{y}_t = \mathbf{H}_t \mathbf{x}_t + \mathbf{v}_t \quad (2-5)$$

$\mathbf{y}_t$: 観測ベクトル

$\mathbf{H}_t$: 観測行列

$\mathbf{v}_t$: 観測ノイズベクトル

$$\hat{\mathbf{x}}_t = \hat{\mathbf{x}}_t + \mathbf{K}_t (\mathbf{y}_t - \mathbf{H}_t \hat{\mathbf{x}}_t) \quad (2-6)$$

$$\mathbf{P}_t = (\lambda_t \mathbf{M}_t^{-1} + \mathbf{H}_t^T \mathbf{R}_t^{-1} \mathbf{H}_t)^{-1} \quad (2-7)$$

2.2 解析モデル、解析結果および考察

解析に用いるモデルとして、質量集中せん断型線形 3 自由度モデルを考える。応答観測値を得るため E1 Centro 地震観測記録(1940、NS、最大加速度を 25gal に修正)をモデルに入力し、地震動入力直後より 3 秒後にモデルの一部の剛性が低下(同時にその部分における減衰定数が増加)したものととして数値解析を行う。損傷の分類として、「ばね 1 の剛性低下」、「ばね 2 の剛性低下」および「ばね 3 の剛性低下」の 3 種類を対象とする。また、観測条件として、変位および速度応答が「全質点で観測」された場合と「限られた質点で観測」された得られた場合を考える。観測データから適応型カルマンフィルターを用いてパラメーター同定を行い、突然生じる剛性低下(減衰定数増加)に対するアルゴリズムの追従性を検証する。

図 2-1 はばね 1 の剛性低下の生じた構造物に対し、地動加速度および質点 1 の変位、速度応答を用いて同定を行った際に得られる固有円振動数パラメーターの時刻歴であり、ばね 1 の剛性低下が判断されている。一方、図 2-2 は同じ構造物に対し、地動加速度および質点 3、2 の変位、速度応答を用いて同定を行ったものである。この図から明らかなように、ばね 1 の剛性低下を同定できていない。これは、観測点数は多ければ良いというものではなく、同定の目的に適した観測点配置を選択することが重要であることを示唆している。

キーワード：適応型カルマンフィルター、損傷検出、赤池ベイズ情報量基準、部分構造化
連絡先：京都大学防災研究所(〒611-0011 宇治市五ヶ庄・電話 0774-38-4065・FAX0774-38-4070)

3. 赤池バイズ情報量基準を用いた損傷同定

3.1 赤池バイズ情報量基準

赤池バイズ情報量基準（ABIC）とは、将来の観測量の分布予測に関する評価基準であり、ABIC 値の大きさがモデルの悪さを示す。具体的には、

$ABIC = -2 \times (\text{最大対数尤度}) + 2 \times (\text{超パラメーター数})$ と計算される。

3.2 数値解析

ばね1に剛性低下の生じた6自由度構造系を対象に、「ばね1の損傷を仮定」したモデルから、「ばね6の損傷を仮定」したモデルまで6種類の損傷モデルを考え、ABIC を計算し、最適な損傷モデルの決定を行った。その結果が、図3-1である。

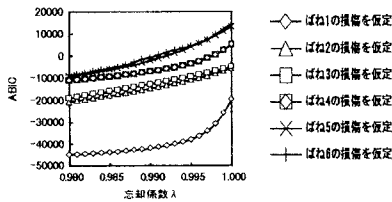


図3-1 ABIC によるモデルの決定

この図から明らかにばね1の損傷を判断することができ、また実際に設定したモデルとも一致していることが分かる。

4. 部分構造化による損傷評価

ここでは、部分構造化により観測点毎に構造物を細

分化し、それぞれの部分構造ごとに損傷の有無を検証する手法を提案し、その概念を紹介する。

質点(n)、(m)、(1)（ただし、 $n > m > 1$ ）において変位、速度、加速度応答が観測される場合を考える。いま、順に質点(m)以上のばね要素におけるパラメーターに関しては損傷同定が完了し、すべての値が分かっているものとする。そこで、質点(m)-(1)間におけるばね要素について、損傷の検出を行う。質点(1)の加速度データは観測値として得られているので、この加速度応答を入力とする質点(1)-(m-1)間の構造系を考えると、質点(m-1)が質点 m からせん断力を受ける(m-1-1)自由度構造系となる。ここで質点(m)-(1)間のばね要素に損傷はないものとして応答計算を実施すると質点(m-1)の応答が得られる。今度はこの質点(m-1)の加速度応答を入力とする質点(n)-(m-1)間の構造系を考え、同様に応答計算を実施する。そうして質点(n)に関する応答が得られる。もし、ここで得られた質点(n)の応答が観測データと一致するならば、質点(m)-(1)間で施した「損傷なし」という仮定が正当化される。一方、両者の応答が一致しない場合は、質点(m)-(1)間のばね要素に損傷があることを意味し、何らかの手法により損傷同定を行う必要がある。

こうして、最下部まで検証を進めていくことで、固定された観測点配置から損傷箇所の絞り込みが行え、必要ならば、損傷していると判断された箇所のみに対して、これまでに紹介した手法もしくは常微震動を用いた同定等を実施することで、詳しい損傷同定が行える。

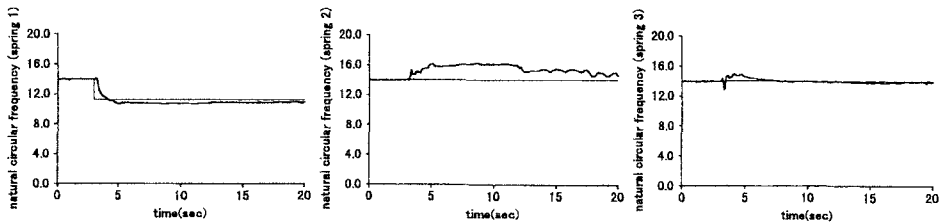


図2-1 質点1のみ観測

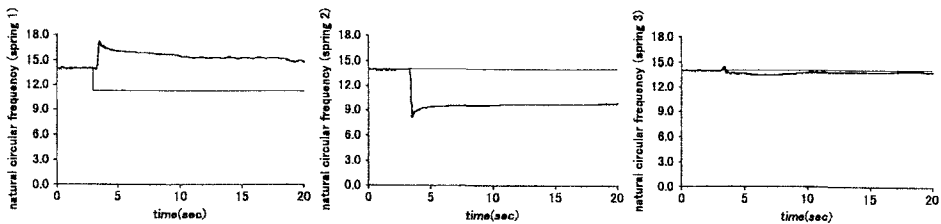


図2-2 質点2,3観測