

振動固有モードに関する統計的变化検知手法の検討

日本電気(株) 正会員 清川 裕

日本電気(株) 正会員 葛西 茂

日本電気(株) 正会員 木下 翔平

1 はじめに

道路橋などの損傷を検知する手法として、振動固有モードの変化に着眼した研究事例が多々報告されている^{1)~3)}。それら研究事例のうち、損傷有無の検知だけを目的とした大域的な検知法では、計測1回毎または複数回の期待値等における変化度を計算するため、計測の偶然誤差に検知性能が左右される。この誤差は、振動固有モードの分析に必要なパラメタが多いことから、誤差評価が複雑になってしまうという課題があり、誤差を考慮した変化検知の事例は稀であった。

そこで著者らは、多次元パラメタの情報量を損傷検知の指標とし、確率密度比直接推定による変化検知⁴⁾を提案する。健全モデルと疑似的な損傷モデルに対する有限要素解析結果に、偶然誤差を加えて試行した。その結果、大域的な検知法で誤差を考慮した変化検知が可能であることを確認した。

2 提案手法

本手法は、多点同時計測された振動データから共振周波数における振幅と位相とを要素に持つベクトルを特徴ベクトル $\mathbf{s}$ とし、健全時において特徴ベクトルが従う確率密度関数 $p(\mathbf{s})$ と、劣化・損傷を含む特徴ベクトルが従う確率密度関数 $q(\mathbf{s})$ との確率密度比 $r(\mathbf{s})=p(\mathbf{s})/q(\mathbf{s})$ を直接推定する。負対数密度比 $-\ln(r(\mathbf{s}))$ は、シャノン情報量に相当するため、特徴ベクトルをスカラ値で表現できる。測定毎に情報量が定義できるため、偶然誤差の評価が可能となる。確率密度比の推定方法は、カーネル関数の線型和 $r_{\alpha}(\mathbf{s}) = \alpha^{\text{tr}} \psi(\mathbf{s})$ で表せると仮定し、カーネルの重みづけ α を複数回の計測データから推定する。重み付けの推定方法は、式(1)で表す誤差関数 $E(\alpha)$ を最小にするように導出する。積分計算を実行し、L2 正則化を加えると式(2)(3)(4)と

なるため、密度関数 $p(\mathbf{s})$, $q(\mathbf{s})$ を推定しなくても、密度比関数の推定が可能である。

$$E(\alpha) = \frac{1}{2} \int dx \{r_{\alpha}(x) - r(x)\}^2 q(x) \quad \dots (1)$$

$$\min_{\alpha} \left[\frac{1}{2} \alpha^{\text{tr}} H \alpha - \alpha^{\text{tr}} h + \frac{\lambda}{2} |\alpha|^2 \right] \quad \dots (2)$$

$$H = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N_q} \psi(x_n^{(q)}) \psi^{\text{tr}}(x_n^{(q)}) \quad \dots (3)$$

$$h = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N_p} \psi(x_n^{(p)}) \quad \dots (4)$$

3 数値実験

最初に、有限要素法(FEM)を用いて振動モードを解析し、次に健全モデルと損傷モデルの固有振動モードについて確率密度比を求めた。最後に400回の繰り返し計測における負対数密度比の頻度分布を求めることで誤差を評価し、モデル同士の頻度分布を比較することで変化検知を試行した。

振動モードの解析は健全モデルと疑似的な損傷モデルを対象とした。また、疑似的な損傷を $L/4$ ($L=800$ mm)に加えた $L/4$ 損傷モデルを作成した。各モデルの解析緒元を表1に、解析モデルを図1-a)と図1-b)に示す。モデルの材質はコンクリートとし、ヤング率は32 GPa、ポアソン比は0.17、密度は2400 kg/m³とした。観測点は、中央ライン13点とした。解析対象とする振動固有モードはたわみ1次モード(モード1)とたわみ2次モード(モード2)とした。モードは、計測毎の誤差として正規分布を仮定した乱数を加えた。

誤差は情報量の頻度分布の中央値と68%信頼区間($\pm 1\sigma$)を求めることで評価した。変化検知は各モデル同士で中央値が 1σ 以上離れているかどうかで判断した。変化検知に用いる特徴ベクトルは各モードを選択した。また、モード1とモード2を総合した変化

キーワード 振動固有モード, 変化検知, 統計分析, 損傷検知, モード, 診断

連絡先 〒211-8666 神奈川県川崎市中原区下沼部 1753 日本電気株式会社 中央研究所 価値共創センタ TEL 044-431-7659

検知のため、モード1とモード2を合わせた場合も試行した。比較のためFEMの振動固有モード同士を対象とした、モード信頼性評価基準(MAC)による変化検知も試行した。

表 1 有限要素モデル

モデル	健全	L/4 損傷
サイズ	800 x 100 x 50	800 x 100 x 50
クラック位置	-	200
境界条件	両端面固定	両端面固定

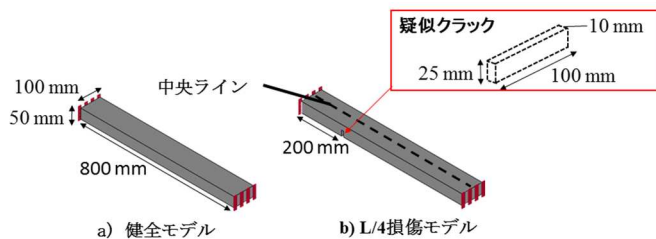


図 1 有限要素モデル

4 結果

4.1 有限要素法

FEMの振動固有モード解析結果を図2-a)と図2-b)に示す。振動固有モードの振幅は、振幅の二乗和平方根が1になるように規格化した。図から、L/4損傷モデルは、健全モデルと比較して、モード1においてほとんど変化していない。一方、モード2においては位置200 mmにおける振幅が変化した。

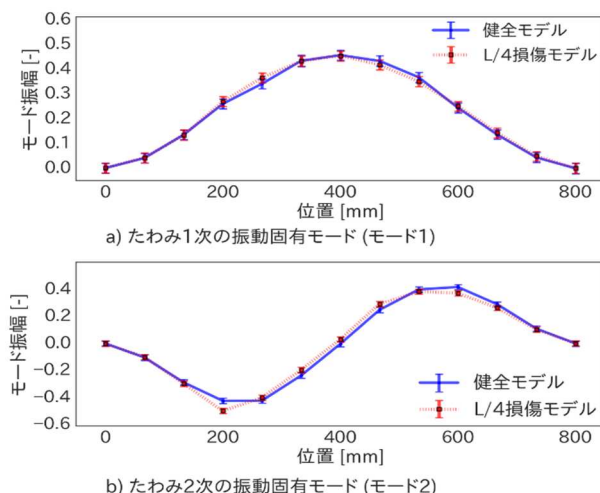


図 2 有限要素法による振動モード形状

4.2 情報量比較とMACによる変化検知結果

情報量比較とMACによる変化検知の結果を図3-a)と図3-b)に示す。特徴ベクトルとしてモード1を選択した場合、L/4損傷モデルの変化度は誤差の範囲

で一致した。MACによる比較では0.995~1.000の範囲で収まった。モード2の場合、L/4損傷モデルは、 1σ 以上離れていることを確認した。MACによる比較では、MAC値が0.012変化した。しかし、一般的にMACは0.9以上が相似と言われているため、差があるとはいえない。モード1とモード2を組み合わせた結果も健全モデルと比べて 1σ 以上離れていることを確認した。結果から誤差を加味した変化検知が可能であると考えられる。

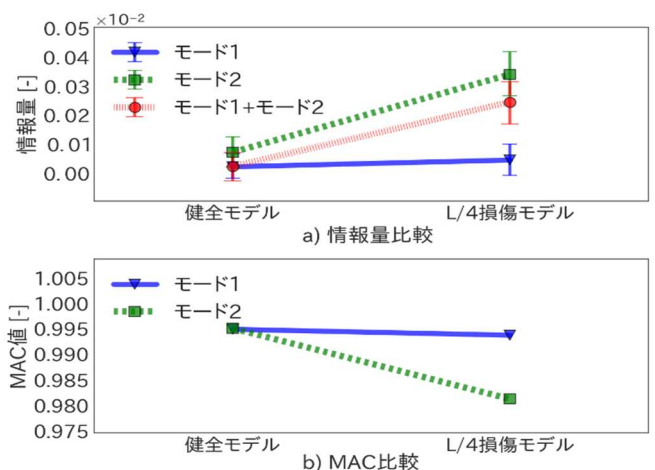


図 3 情報量比較とMACによる検知結果

5. まとめ

本研究は、統計的变化検知手法である確率密度比直接推定による変化検知を提案し、損傷がないモデルと疑似的な損傷モデルに対し適用した。結果、大域的な検知法で誤差を考慮した変化検知が可能であることを示した。

参考文献

- 1) 金哲佑, 他, “損傷前後の鋼単純トラス橋の振動特性同定と統計的分析による異常検知,” 土木学会, 2014.
- 2) 門田峰典, 他, “実損傷を有する横断歩道橋の補修によるモード形状の変化,” 土木学会, 2015.
- 3) 豊崎裕司, 他, “単純鋼桁橋の部分損傷がモード特性に及ぼす影響に関する解析的検討,” 土木学会, 2013.
- 4) Kawahara, et al., "Sequential change-point detection based on direct density-ratio estimation," Statistical Analysis and Data Mining, 2011.