

### 加速度応答を用いた損傷規模推定手法の一般化に関する研究

京都大学大学院工学研究科 学生員 ○別所 謙  
 J R九州株式会社 非会員 松山卓真  
 京都大学大学院工学研究科 正会員 白土博通

京都大学大学院工学研究科 正会員 服部 洋  
 京都大学大学院工学研究科 学生員 岡野 雅  
 京都大学大学院工学研究科 正会員 八木知己

#### 1. はじめに

我が国では、膨大な数の構造物が供用されているが、その多くが建設から長い年月が経過しており、劣化・老朽化が問題となっている。このことを受けて近年、目視点検に加えより簡易かつ早期に損傷を発見することを目的として、構造物に対するヘルスマonitoringが注目されている。本研究では、橋梁の振動応答から、損傷の有無及び損傷規模の推定を行うシステムの提案を行う。また実用化に向けて提案システム構築の省力化について検討を行う。

#### 2. 提案システムの手順

以下に、提案システムの手順を示す。

- 1) 健全状態の橋梁から取得した加速度波形に対し、台形法を用いて速度データを算出する。
- 2) 健全状態の加速度・速度データを用いてニューラルネットワークにより振動応答モデルを構築する。

本研究では、ニューラルネットワークにおける入力値として、時刻  $t$  の加速度・速度データの2つの値、出力値として時刻  $t+\Delta t$  の加速度データを用いる。ここで、 $\Delta t$  はデータの取得間隔である。

- 3) 検査対象の橋梁から取得する加速度波形に対し、1)と同様に台形法を用いる事で、損傷状態の加速度・速度データを取得する。
- 4) 3)で得られた加速度・速度データを2)で構築した振動応答モデルに入力し、予測振動値を取得する。予測振動値に対し以下の計算を行う事で、平均誤差  $err$  を算出する。

$$err = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} | \tilde{a}_{(j+1)}^* - \tilde{a}_{(j+1)} | \quad (1)$$

但し、 $n$  はデータ数、 $\tilde{a}_{(j+1)}^*$  は予測振動値、 $\tilde{a}_{(j+1)}$  は実測値である。

検査対象の橋梁に損傷がある場合、固有振動数が変化すると考えられる。その場合、対象橋梁から取得される振動応答も変化するため、予測振動値と実測値の

キーワード ニューラルネットワーク、構造ヘルスマonitoring、損傷同定

連絡先 〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂 C1 棟 457 号室 橋梁工学研究室 TEL075-383-3167

間の予測誤差が大きくなると考えられる。

5) 4)で算出した  $err$  と曲げ剛性の低下度との関係から、対象橋梁の損傷の有無を推定する。また、 $err$  と剛性の低下度の中に相関がある場合、その関係を定式化することで損傷規模まで特定できる可能性がある。

#### 3. 数値実験

##### 3.1 検証対象

本研究では、各接点の橋梁の自由振動を想定し、対象橋梁の振動モードを想定した、図-1に示すような周波数分布を持つ図-2のような簡易波形を作成し、その波形を加速度波形とみなし提案システムを適用することを試みる。この検討により、波形にノイズや乱れが無い場合の提案システムの有効性を示す。

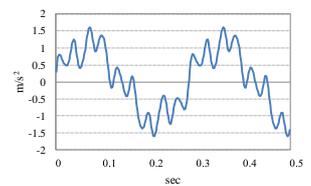
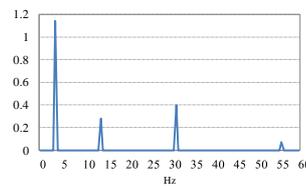


図-1 周波数分布

図-2 簡易波形

また、外力の違いによって、図-1以外にも、周波数分布は変化すると考えられる。本研究では、周波数分布の変化の1つとして、卓越モードの変化について考察を行う。そこで、図-1に示す周波数分布以外に、図-3に示す2次モード、3次モードが卓越した際の周波数分布から作成した簡易波形に対しても提案システムの適用を試みる。

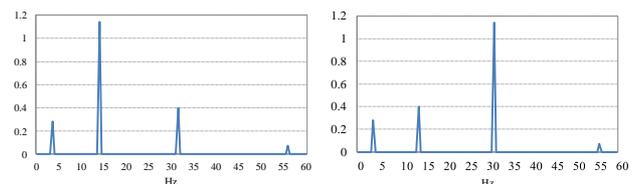


図-3 2次・3次が卓越した場合の周波数分布

##### 3.2 検証条件

一般に橋梁の曲げ剛性が低下すると、固有振動数が減

少するため、簡易波形における損傷を固有振動数の低下で定義する。ここで、各モード間で振動数の低下度は同一とする。つまり、高次のモードの方が振動数変化の絶対量が大きいこととなる。これは橋梁の各モードの固有振動数は曲げ剛性の低下により、一定の割合で低下する事を想定している。本研究では、簡単のため、スペクトルの大きさは変化させず一定とする。

また、固有振動数の低下度は橋梁において(2)式を用いる事により曲げ剛性の低下度に換算する事が可能である。

$$\frac{EI}{EI_1} = \left(\frac{n}{n_1}\right)^2 \quad (2)$$

但し、 $EI, EI_1$  はそれぞれ低下後と低下前の曲げ剛性、 $n, n_1$  はそれぞれ低下後と低下前の固有振動数である。

### 3.3 検証結果

前述した1次～3次モードがそれぞれ卓越している周波数分布から作成した簡易波形に、提案システムを適用した際の、 $n/n_1$  と  $err$  の関係を図-4 に示す。

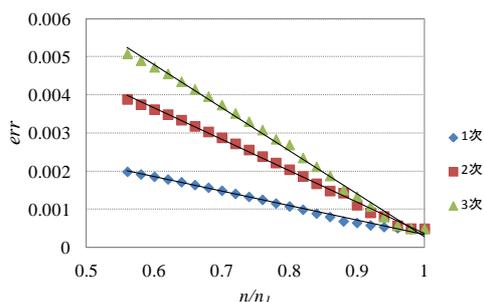


図-4  $n/n_1$  と  $err$  の関係

図-4 から、それぞれのモードが卓越した場合について、 $n/n_1$  と  $err$  の間に負の相関が確認できる。このため、 $n/n_1$  と  $err$  の関係について図-4 に示すように線形近似による定式化を行う。

- ・ 1次  $err = -0.0038 \times \frac{n}{n_1} + 0.0041$
- ・ 2次  $err = -0.0082 \times \frac{n}{n_1} + 0.0086$  (3)
- ・ 3次  $err = -0.0113 \times \frac{n}{n_1} + 0.0116$

以下では、定式化を行った(3)式を損傷推定式と呼ぶ。

図-4 における、近似直線は対象との誤差がほとんどの要素に対し 4% 以下であり、高い精度で近似による定式化が出来ていると考えられる。

このことから、定式化を行う事で、検査対象の固有振動数の低下度が不明な場合でも、振動応答から平均

誤差  $err$  を算出し、(3)式に代入する事で、振動数の低下度を特定できる可能性があると考えられる。このことから、提案システムにより、橋梁の損傷の有無だけでなく、損傷規模までを特定できる可能性がある。

また、図-4 より高次のモードが卓越している場合の方が、平均誤差  $err$  の値が大きく、(3)式の損傷推定式における係数の絶対値が大きいたことが確認できる。これは、モード間での各固有振動数の低下度は一定としているため、高次のモードの方が振動数変化の絶対量が大きくなることに起因していると考えられる。3次モードが卓越している場合、卓越モードの振動数変化がその他の場合と比較して大きいため、振動応答も大きく変化したと考えられる。このことから、提案システムは高次モードが卓越している場合により敏感に反応し、効果的であると考えられる。

(3)式から、卓越モードが変化した際も損傷推定式は算出が可能であり、損傷推定式の各係数がおよそ2倍、3倍に変化していることが確認できる。このことから、周波数分布の変化と損傷推定式の変化の間に相関があれば、補正を掛けることで、ある構造を対象とした関係が、異なる構造にも適用できる可能性があり、提案システムの省力化が期待できると考えられる。

### 4. おわりに

本研究では、ニューラルネットワークによる振動応答モデルを用いた、橋梁の損傷有無及び損傷規模を推定する手法の提案を行った。次に、橋梁の周波数分布を想定した簡易波形に提案システムを適用する事で、ノイズや乱れが無い場合、提案システムは損傷規模までを特定し得ることを示した。

また、周波数分布における卓越モードの変化について検討したところ、卓越モードに依らず提案システムは有効であり、平均誤差  $err$  の値が卓越モードによって変化することが示された。これより、周波数分布の変化と  $err$  の関係を明確にすることで、提案システムの構築における省力化の可能性があると考えられる。

本研究では簡易波形における検証を行ったが、実橋梁においても損傷が生じると、固有振動数が減少する。このため、今回の検証から提案システムは、実橋梁における損傷検知の可能性があるとと言える。今後は、実際の波形に対する提案システムの適用、及び周波数分布と平均誤差  $err$  の関係についてより明確にすることで、提案システムの一般化が図れると考えられる。