

精密小型加振機による取得データに対応した振動特性同定手法の開発

東京理科大学 学生員 ○渡邊 和樹
東京理科大学 正会員 佐伯 昌之

1.はじめに

著者らは構造物の振動特性を把握するために、精密小型加振機と無線センサネットワークを用いた構造センシング手法を提案している¹⁾。本研究では、この手法のデータ取得までの数値シミュレーション、取得データに対応した振動特性同定手法の検討を行った。

2.本研究で検討する構造センシング手法の概要

本研究で検討する構造センシング手法では、振源により対象構造物を加振し、構造物に配置された無線センサノードで加速度応答の時刻歴を測定する。無線センサノードはこれを離散フーリエ変換することにより周波数応答関数に変換し無線通信によりサーバへ転送する。この手法では振源として精密小型加振機を用いる。精密小型加振機は偏心させた錘をモータで回転させることで遠心力を発生させ構造物に振動を励起する。モータの回転数は高精度に制御することができ、無線センサノードと時刻同期しているため周波数応答関数を高精度に計測できる。さらに精密小型加振機は、モータの回転数を変調させることで周波数応答関数の多数の周波数成分を同時に獲得することができる。

3.データ取得までの数値シミュレーション

本研究で検討する構造センシング手法のハードウェアは開発途中であるため、実計測で想定される振源関数、周波数応答関数、周波数伝達関数を計算するシミュレーションプログラムを作成し、振動特性同定手法の開発を行う。振動特性の同定には周波数伝達関数を用いるので、それを計算するまでの手順を以下に示す。

- 1)3次元有限要素法による単純梁の振動解析プログラムを用いて構造物の周波数伝達関数を計算する。
- 2)精密小型加振機による振源関数を計算する。(図1)
本研究ではモータの回転数を三角関数で変調させるようにする。
- 3)周波数伝達関数に精密小型加振機による振源関数を乗じ理想的な周波数応答関数を計算する。
- 4)周波数応答関数を離散フーリエ逆変換し、加速度応

答の時刻歴を計算する。さらにランダムノイズを乗せることで実計測を再現する。(図2)

- 5)加速度応答の時刻歴を離散フーリエ変換しノイズが含まれる周波数応答関数を計算する。(図3)

- 6)ノイズが含まれる周波数応答関数を振源関数で除し、周波数伝達関数を計算する。(図4)

ここで図4を見ると、周波数伝達関数の所々にひげ状に突出している成分があることがわかる。震源関数を拡大した図5を見ると、遠心力の大きさは各周波数成分でバラバラであり極端に小さいものがあることがわかる。周波数成分が極端に小さい震源関数で周波数応答関数を除すことで、周波数伝達関数が大きな値となり、ひげ状に突出してしまいばらついてしまう。高精度な周波数伝達関数を取得するためには、各周波数で遠心力の大きさのばらつきが少なく、各周波数で遠心力の大きさがある程度均一な震源関数を設定する必要がある。

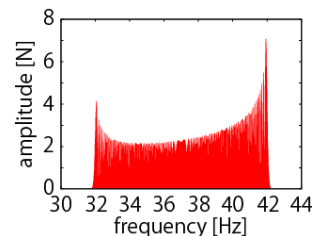


図1 振源関数

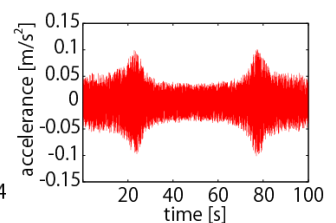


図2 加速度応答の時刻歴

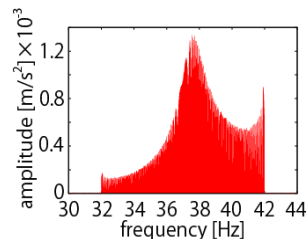


図3 周波数応答関数

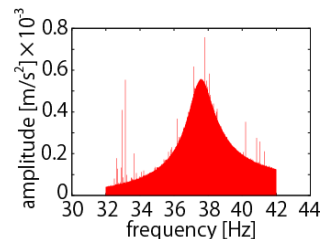


図4 周波数伝達関数

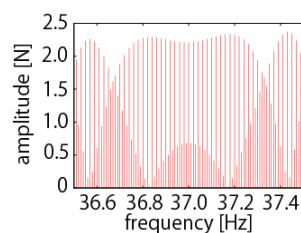


図5 震源関数(拡大)

キーワード：精密小型加振機，無線センサネットワーク，振動解析，周波数伝達関数

連絡先：〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641 東京理科大学理工学部土木工学科 TEL：04-7124-1501

4. 振動特性同定手法の開発

本研究では、振動特性を同定するために周波数伝達関数を式(1)のようにモデル化する。式(1)は多自由度バネ質点系における運動方程式から導出されたものである²⁾。式(1)を用いて実部と虚部を同時に考慮した誤差関数 λ を作成し、それが最小になるように未知パラメータを決定する。固有振動 f_r 、減衰比 ζ_r 、等価剛性 K_r 、剰余質量 S 、剰余剛性 Z を5つの振動特性とし、これを未知パラメータとすることで振動特性を同定する。

$$\left. \begin{aligned} L_{\text{実}} &= \sum_{r=1}^n \frac{-\Omega_r^2 \beta_{ri}^2 (1 - \beta_{ri}^2) / K_r}{\{1 - \beta_{ri}^2\}^2 + 4\zeta_r^2 \beta_{ri}^2} + \frac{1}{S} - \frac{\omega^2}{Z} \\ L_{\text{虚}} &= \sum_{r=1}^n \frac{2\zeta_r \Omega_r^2 \beta_{ri}^3 / K_r}{\{1 - \beta_{ri}^2\}^2 + 4\zeta_r^2 \beta_{ri}^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

この手法によって正しく曲線適合が行えているかを確認するために、周波数伝達関数を計算する際にノイズを乗せなかったデータに対して曲線適合を行った。曲線適合の結果を図6に示す。曲線適合における残差を計算すると、対象データと近似曲線には約3.05%のずれがあることがわかった。さらに実数部分における曲線適合の結果に着目すると、対象データと近似曲線にずれが生じていることがわかる。今回の手法では、3次元単純梁の構造に対して多自由度バネ質点系の運動方程式から導出した式と対象となるデータに対して最小二乗法を適用している。以上のようなモデル化誤差により、対象データと近似曲線とにずれが生じてしまったのではないかと考えられる。

次に実計測で想定されるノイズを乗せた周波数伝達関数データに対して曲線適合を行った。曲線適合の結果を図7に示す。曲線適合における残差を計算すると約5.05%のずれがあることがわかり、先程のものと比較すると大きくなってしまった。ノイズが含まれることによって周波数伝達関数がばらついてしまい、それにより周波数伝達関数の突出した部分を誤ってモードであると判断してしまったため、このように残差が大きくなってしまったと考えられる。さらに、図7で求めた近似曲線と、図6で求めた近似曲線を比較すると、全体的に右にシフトしていることがわかる。他の解析結果とも比較をすると求めた近似曲線は図6で求めた近似曲線より右にシフトする傾向であった。ここで周波数伝達関数に着目すると38[Hz]付近の伝達関数の周波数成分が突出する場合が多数あった。これは37.8[Hz]の振源関数が 1.61×10^{-2} [N]と極めて小さいため周波数

伝達関数が突出することが多くなり、誤ったモードの判断から近似曲線が図6に比べ、右にシフトしてしまうためであると考えられる。将来的には構造物の健全性評価の判断材料として損傷によるパラメータの変化を用いることを考えている。その変化が損傷によるものなのかノイズによる誤ったモードの判断からのものなのかを明確にしなければならない。以上のことから、周波数伝達関数がばらついてしまった場合、誤ったモードの判断を回避するような基準を設ける必要がある。

今回開発した手法では、最小二乗法を適用する式のモデル化誤差による曲線適合のずれが生じてしまった。厳密な振動特性の同定のために今回検討した手法の改良、あるいは新たな手法の検証が必要であると言える。

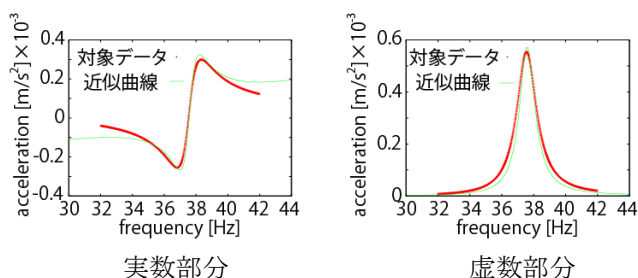


図6 最小二乗法による曲線適合結果(ノイズなし)

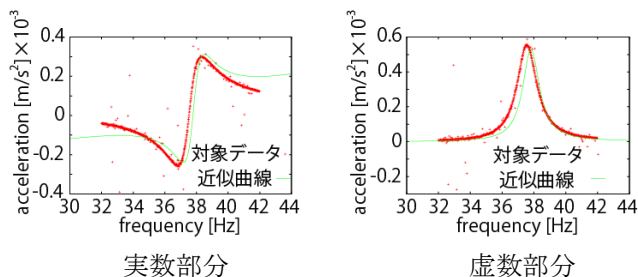


図7 最小二乗法による曲線適合結果(ノイズあり)

5. まとめ

本研究の成果を以下にまとめる。

- ・精密小型加振機と無線センサネットワークを用いた構造センシング手法におけるデータ取得までの数値シミュレーションプログラムを開発した。
- ・想定される取得データを用いた振動モード同定手法を開発し曲線適合を行うプログラムを開発した。

謝辞

本研究は科学研究費補助金(若手研究(B):22760347)の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 日高ちはる, 佐伯昌之: 無線センサネットワークを用いた周波数応答関数の高精度計測, 土木学会第65回年次学術講演会, p855-856, 2010
- [2] 長松昭男, モード解析, 培風館, 1985