

精密小型加振機と無線センサネットワークを結合した構造モニタリング手法の基礎的検討

東京理科大学 学生員 ○日高 ちはる

東京理科大学 正会員 佐伯 昌之

1 はじめに

地方には、高度経済成長期に建設された橋梁、道路、上下水道、ダムなどの多くの社会基盤構造物があり、近年、それらの劣化や老朽化が深刻になってきている。しかし、国や地方自治体の財政がひっ迫してきた現在、社会基盤構造物の日常的な点検に対して高価な技術を導入することは現実的ではないと考えられる。そこで、修復が必要な構造物を選別するために、定期的に診断・評価し、健全性を把握する必要がある。その方法の一つとして、構造モニタリングの研究が進められてきた¹⁾。構造物の性能評価やアセットマネジメントの概念から、構造モニタリングの果たす役割は、極めて重要になってくると考えられる。

本研究では、精密小型加振機と無線センサネットワークを結合した構造モニタリング手法の基礎的検討を行うことを目的とする。

2 本研究で検討するモニタリング手法の概要

従来のモニタリングにおいて、振動計測を行う方法として、振動を与えるソース側は、自然によって励起される常時微動や交通荷重、風荷重、地震荷重などが主であった。しかし、このような自然荷重は、常に入力信号の不明瞭さが問題となる。そこで、本研究では、入力が既知となる手法を考える。そのために、古川によって開発された小型加振機を用いた構造モニタリング技術²⁾の高精度化を試みる。この小型加振機は、偏心した錘を回転させることで発生する遠心力で構造物を加振するもので、位相を制御することで加振力を既知とすることができる。

また、従来のモニタリングにおいて、データ取得方法として、センサノードが測定した情報を有線でサーバに送信する方法がある。構造物の状態をより正確に把握するためには、情報量を多くする必要があるので、センサノードを多点に配置することが望ましいと考えられる。しかし、センサノードとサーバを結ぶ配線は、測定位置が多くなるにつれて、煩雑でコスト高となるだけでなく、観測ノイズ混入の原因にもなる。対照的に、無線センサネットワークは

ケーブルを配線しないため、拡張性があり、設置コストを安価にできると考えられている。また、1つ1つのセンサノードが自立・自律的にネットワークを構築するので、データ収集の効率化を図ることができる。

以上より、入力を既知にすることを可能とする精密小型加振機と低コストでセンサを密に設置することができる無線センサネットワークを結合することにより、モニタリングの高精度化を目指す。

3 時刻同期とフーリエ変換

小型加振機を用いる場合、構造物の日々の利用の弊害にならないように、その加振力は非常に弱いものでなくてはならない。そのため、観測される加速度応答は日々の交通荷重や風荷重などのノイズに覆われており、構造物の健全性を正確に評価することは難しいと考えられる。この問題は、観測したデータをスタッキングし S/N 比(ノイズに対するシグナルの比)を改善することにより解決する。ここで、スタッキングを正常に行うには、小型加振機と無線センサ間で時刻同期されている必要がある。時刻同期に関しては、多くの研究事例があり、解決されつつあることから、ここでは省略する²⁾。

また、無線センサは電力供給とデータ欠損の問題があり、膨大な加速度データを無線通信で送ることは現実的ではないと考えられる。そこで、センサノード内でフーリエ変換を行い、加速度応答のデータから加振した振動数に対応する振幅と位相のデータを抽出することにより、通信データ量を大幅に削減することを考える。このような観測システムを用いた場合、各センサ設置点における様々な周波数での振幅と位相を得ることができる。

4 有限要素法による単純梁の数値シミュレーション

ここでは、上記システムで得られるデータを想定して、構造物に損傷があるときとないときにどのような変化が見られるのかシミュレーションを行う。

4.1 問題設定と解法

減衰を考慮しないとき、外力が作用する単純梁の運動方

キーワード：精密小型加振機、無線センサネットワーク、構造モニタリング、維持管理

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

程式は

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{f}(t)$$

で表される． $\mathbf{M}$ ， $\mathbf{K}$ はそれぞれ質量マトリクス，剛性マトリクスで， $\mathbf{u}(t)$ ， $\mathbf{f}(t)$ はそれぞれ変位ベクトル，外力ベクトルである．

この運動方程式を周波数領域で解くと変位応答は

$$\mathbf{U}(\omega) = [-\omega^2 \mathbf{M} + \mathbf{K}]^{-1} \mathbf{F}(\omega)$$

となる．ただし， $\mathbf{U}(\omega)$ ， $\mathbf{F}(\omega)$ はそれぞれ変位，外力のフーリエ変換である．

実際に測定するものは加速度であるが，加速度に $-\omega^2$ をかければ変位になることから，損傷があるときとないときの全体的な変位を比較することにする．

4.2 有限要素法解析モデル

単純梁の有限要素法モデルは，全長 20.0m，幅 2.0m，厚さ 0.5m とし，弾性率 3.0×10^{10} Pa，密度 2.5×10^3 kg/m³ とする．この単純梁を梁要素に 40 分割し，接点番号(Node No.)と要素番号(Element No.)を付けたものを図 1 に示す．

4.3 シミュレーション結果

図 2 に本システムで観測される結果の一例を示す．横軸が要素番号，縦軸が変位である．これは，振源の位置を中央に固定し，要素番号 11 の剛性低下率を 1%低下させることによって損傷を仮定したときのシミュレーション結果である．ただし，振動数は 5 次の固有振動数付近の値を選定した．このモデルの 5 次の固有振動数は 49.09Hz であるが，図 2 に示すように，固有振動数に近い方が損傷があるときとないときの変化が大きいことが分かる．

次に，図 3 に本研究で扱う解析モデルの振動数と変位の関係を示す．ただし，縦軸が梁の中央での変位，横軸が振動数である．このように，固有振動数付近では，損傷があるときとないときの変位に大きな違いが見られる．

その他に，シミュレーションで得られた結果をまとめる．

1) 振動数と応答の関係性

小型加振機の振動数を固有振動数に近づけると，剛性低下率が 1%程度の損傷でも，損傷があるときとないときで大きな変化が見られた．そして，その変化は高次のモードにするほど大きくなる．しかし，応答が非対称にならないため，損傷の位置は同定できない．

2) 損傷の位置と応答の関係性

損傷が振幅の腹の位置にあるとき，損傷があるときとないときの変化が最も大きい，損傷が節の位置に近づくに

つれて，変化が小さくなり，節の位置では損傷があるときとないときの変化が全く見られない．

5 まとめ

本研究では，精密小型加振機と無線センサネットワークを結合した構造モニタリング手法を提案し，その第一段階として，簡単な数値シミュレーションを行った．その結果，モニタリングのときは 0.05Hz きざみでサンプリングを行う必要があると考えられる．また，変化が見られないときでも，誤った判断を避けるために，振動数を他の固有振動数に設定する必要がある．

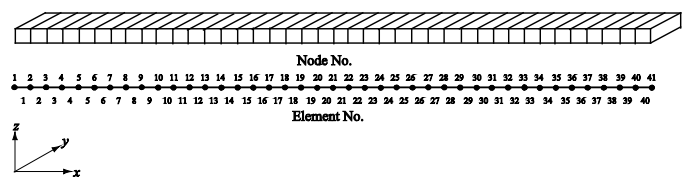


図 1：単純梁の有限要素法解析モデル

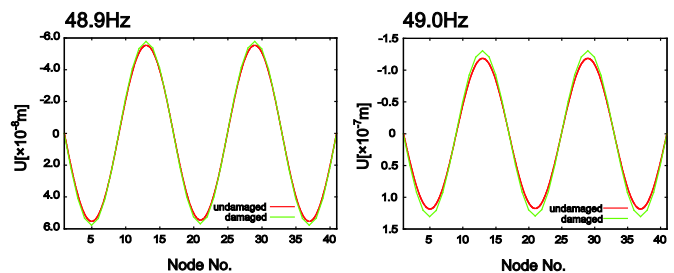


図 2：本システムで観測される結果の一例

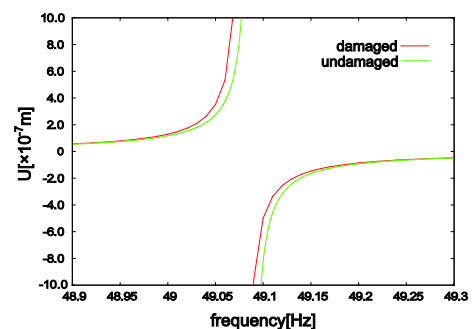


図 3：梁の中央での変位と振動数の関係

参考文献

- 1) Aiko FURUKAWA : Development of Structural Damage Identification Technique using micro Shaking Device, Doctoral dissertation, Faculty of Engineering, Kyushu University, 2007
- 2) 堀江信吾, 猿渡俊介, 倉田成人, 森川博之, 青山友紀 : 無線センサネットワークを用いた地震モニタリングにおける同期性能の評価, 電子情報通信学会論文誌, vol. J92-B, no. 1, January 2009