513 圧電素子を用いた構造物損傷検知器の開発 Development of Piezoceramic Embedded Damage Detecting Device for Structural Health Monitoring

○正 森崎 哲也 (山口大・院), 正 江 鐘偉 (山口大)

Tetsuya MORISAKI* and Zhongwei JIANG*

* Dept. of Mechanical Engineering, Yamaguchi University, Ube, 755-8611, Japan

Key Words: Piezo-Element, Structural Health Monitoring, Piezoelectric Impedance Response, AD converter, Least-square method

1. 緒言

非破壊検査方法の一つとして圧電素子をセンサかつ、アクチュエータとして用いたインピーダンス計測法⁽¹⁻³⁾がある。この方法の基本原理は構造物中の損傷による物理的変化が構造物の機械的インピーダンスの変化をもたらすので、その変化を構造物に貼り付けてある圧電素子の電気インピーダンス変化として測定して、健康状態に測定しておいた結果と比較することにより、損傷の発生又は、進展を監視する手法である。しかしながら、本手法を長大構造物のヘルスマonitoringに適用するには、圧電素子を複数の箇所に設置する必要がある、その配線など設置やコストなどにかかわる問題が多く存在する。例えば配線が長くなると、環境因子の影響により配線自身のインピーダンス変化が問題となる場合も考えられる。本研究で考案したシステムは、測定装置の小型化と低コスト化をはかり、図1に示すように、圧電素子と装置を一体化したものを構造物に直接取り付け、構造物の情報採取を行うものである。本報告ではこの計測システムを構築するために必要なスペックを実験により調べ、その設計指針を提示する。

Fig. 1. Proposed piezoceramic embedded damage detecting system.

2. インピーダンス測定システム

電気的インピーダンスとは電圧と電流の比の値であり、測定対象物に電圧を加えて、そのときに測定対象に流れる電流を測定することでインピーダンス値を求めることができる。しかしながら、通常、電流を高精度に計測することは困難なため、通常測定対象になんらかの回路を接続して直接または間接的に計測している。従って、インピーダンス測定システムは基本的に、定められた大きさの電圧を出力する正弦波発生回路、測定対象に接続する回路、圧電アナログ信号をコン

ピュータに入力するためのAD変換回路とインピーダンスを計算するコンピュータから構成される。

本研究では、できるだけ実用システムに近く、かつ掃引周波数分解能とサンプリング周期とある程度自由に調整できる実験検証システムを図2に示すとおり構築した。このシステムは正弦波電圧発生回路として Wellpine 社製のダイレクトデジタルシンセサイザ(TC170C030AF)ICを用い、PICマイコンにより掃引周波数ステップ 1[Hz]で正弦波電圧を出力できる。AD変換器は Interface 社製の PCI-3525 ボードを採用した。また、測定対象の電流計測のために、図3に示す回路図のように測定対象の圧電素子に抵抗 Z を直列接続して電圧を計測する。インピーダンス測定は以下の手順に従って行う。正弦波電圧発生回路から任意の周波数の電圧を、圧電素子に抵抗 Z を介して印加し、AD変換回路によって正弦波電圧発生回路からの印加電圧 V_F 、抵抗 Z の両端にかかる電圧 V_Z を測定する。 V_F と V_Z から被測定対象物に貼り付けた圧電素子にかかる電圧 V_P を求めた後、これらの電圧振幅値と Z の抵抗値 $R[\Omega]$ を用いて、任意の周波数における圧電素子のインピーダンス値を求める。

Fig. 2. Proposed piezoelectric Impedance Measuring System.

Fig. 3. Schematic diagram of Circuit and PZT

3. インピーダンスの計算方法と評価実験

AD 変換によって測定周期の一周期分サンプリングして得られる離散データ $V_f(n)$, $V_z(n)$ $n=1,2,3,\dots,N$ 及び, PZT の両端にかかる $V_f(n)=V_f(n)-V_z(n)$, $n=1,2,3,\dots,N$ は離散化誤差のみならず, 外乱による影響も受けている. そこで, 本研究では, 電圧信号の離散化データから振幅を得るため正弦波へ近似する方法として最小二乗法を用い, それぞれの振幅値 V_{Fa} , V_{Za} , V_{Pa} を得ることにした. これらの電圧振幅値を用いて PZT のインピーダンス実部 $Re(Z_p)$ は次式によって得られる.

$$Re(Z_p) = \frac{V_{Fa}^2 - V_{Za}^2 - V_{Pa}^2}{2V_{Za}^2} R \quad (1)$$

サンプリング周波数を高める, すなわち N を増やすことにより, インピーダンス計算値に含まれる誤差を抑えることが可能であると考えられる. しかし, その分 AD 変換器の負担が大きくなり, 高価なものが必要となる. 本研究ではアルミニウム梁を測定対象物とし, 適切な N を調べるための実験を以下の手順に従って行った. はじめに, 市販の高性能インピーダンスアナライザ (HP4192A) によって予め測定しインピーダンスピークの現れる周波数域を調べる. その結果, 図 4 に示す 69.8~70.2[kHz] でインピーダンスピークが確認できた. 次に提案したシステムを用いて $N=3$ になるようサンプリング周波数を 210 [kHz] に設定して 10000 回測定を行い, その標準偏差 σ_3 を算出する. 以降同様に, $N=4,6,8$ となるようサンプリング周波数を 280, 420, 560[kHz] に設定し, それぞれの標準偏差 $\sigma_4, \sigma_6, \sigma_8$ についても算出を行った. ここでの付加インピーダンス Z には 500[Ω] の抵抗を用いている. 測定する周波数は, ピークによるインピーダンスの変動が標準偏差へ影響しないようにピークの立ち上がり前の周波数である 69.8~69.9[kHz] とし, この周波数域を 1[Hz] ステップで変化するように設定した. それぞれの結果を図 5 に示す. 図から N を大きくすると標準偏差が小さくなり結果として測定結果のばらつきは抑えられるようになるが, $N=4$ 以上にしてもその効果はほとんど変化していないことが分かる. 従って, インピーダンス測定には $N=4$ で十分であると決定できる.

Fig. 4. Impedance response measured by HP4192A

Fig. 5. The relationship between Standard Deviation and N
(○ σ_3 , ● σ_4 , △ σ_6 , □ σ_8)

さらに, インピーダンス測定結果のばらつきを抑えるために, インピーダンス測定を M 回を行いその平均値を最終的なインピーダンス値として採用することにした. このとき, 95%の精度で誤差を E [Ω] 以内に抑えようとすると必要な標本数 M は次式によって推定できる.

$$M = \left(1.96 \frac{\sigma}{E} \right)^2 \quad (2)$$

ここで σ は標準偏差を表し, 図 5 で示した σ_4 の結果から 3.5 と決定した. 表 1 に E と M の関係を示し, 図 6 に提案したシステムで $N=4$ と設定し, $M=30,500$ のときのインピーダンス測定結果を示す. 図 4 で示した市販のインピーダンスアナライザと図 6 で示した $M=500$ での測定結果とはよく一致していることが確認できる. しかしながら, システムの価格や測定時間の短縮など実用面では様々な制約が起こり, M をより少なく設定しなければならないことが考えられる. その場合は, ヘルスマonitoring 評価方法を検討し, 許容誤差 E を見積もった上で, 表 1 で示した結果を基に M を決定する必要がある.

Table 1. The relationship between Error margin E and Number of sample M

error margin E [Ω]	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
number of sample M	294	131	74	47	33	24

Fig. 6. Impedance response measured by proposed system

4. 結言

本研究では, 鉄橋や高架橋, 送電線鉄塔などの構造物における, 圧電素子を用いたインピーダンス計測システムを提案し, その設計指針を示した. このシステムは小型化低コスト化に配慮しており, 金属疲労や腐食あるいは応力集中点など, 数多く存在する構造物の危険箇所に取り付けることにより, リアルタイムにインピーダンス測定による構造物の健康診断が可能となる.

参考文献

- (1) C. Liang, F. P. Sun and C. A. Rogers, "Coupled Electro- Mechanical Analysis of Adaptive Material Systems Determination of the Actuator Power Consumption and System Energy Transfer", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 5, 1994
- (2) 江 鐘偉, 西村 浩一, 長南 征二, "圧電素子を用いた縦弾性波計測による構造物の損傷監視と位置同定", 日本機械学会論文集, 67-660, C (2001), 2580-2586
- (3) Zhongwei Jiang and Yasutaka Takeuchi, "Damage Assessment for Truss Structural Health Monitoring with Piezoelectric Impedance-Based Technique" Proceedings of ICMIT'01, 283-286, 2001