

圧電素子を用いたインピーダンス計測による応力同定

東京大学工学系研究科 学生員 ○宮下 剛

東京大学工学系研究科 フェロー 藤野 陽三

1. はじめに

社会基盤施設の経年劣化に伴う損傷・事故が近年多発しており、構造物の維持管理の重要性が認識されている。既往の維持管理手法として目視・打音検査などがあるが、経験を要する手法であり、客観的な手法とはいえない。そこで、構造物の健全性を客観的かつ合理的に把握する定量的な構造ヘルスマニタリング手法の確立が求められている。構造ヘルスマニタリング手法には、構造物自身にセンサ機能をもたせたスマート構造化により、構造物の状態を常時把握することを目的とした流れがある。本研究では、このような構造ヘルスマニタリング手法の一つとして近年研究されている圧電素子を用いたピエゾインピーダンス法について扱う。

2. ピエゾインピーダンス法

ピエゾインピーダンス法では、圧電体の電気的特性および機械的特性が連成する性質を利用する。具体的には、図-1のように構造物の表面にセラミックスから成る圧電素子(PZT)を貼り付けたり埋め込んだりする。このとき、圧電素子は軽量であるため、構造物の動的特性に与える影響は小さい。外部から交流電圧を加えると、圧電素子は逆圧電効果に基づいて振動を発生し、構造物内部に波動が伝播する。やがて構造物内部に定常状態が形成されると、圧電素子は圧電効果に基づいて電流を外部に出力することになる。計測結果として、入力電圧と出力電流の比である電氣的インピーダンスが得られる。この手法を用いることにより、構造物に損傷が生じたり構造物の応力の状態が変化したりすることで生じる構造物の動的な応答の変化を電氣的インピーダンスの変化として定量的に評価することが可能となる。

構造物を維持管理するためには、応力状態を正確に評価する必要がある。構造物の応力分布を評価するためには、一般的にひずみゲージが用いられる。ひずみゲージでは、抵抗線の長さの変化が起こらないと応力状態を計測することは不可能である。それに対して、ピエゾインピーダンス法では圧電素子を用いて構造物を強制的に振動させることにより、構造物内部に波動を伝播させる。構造物内部を伝播する波動が、分散性に基づいて応力状態を反映することから、ひずみゲージとは異なり応力状態を一回の計測で絶対的に評価することが可能になる。

ピエゾインピーダンス法に関する既往の研究では、鋼橋梁模型などに人為的に損傷を加えた前後での計測結果を比較し、損傷の有無を定性的に評価している。しかし、構造系のモデル化が十分に行われていないため、ピエゾインピーダンス法により得られる電氣的特性量と構造物内部状態の変化量を定量的に結びつける点では成功していない。近年、宮下ら¹⁾が軸力を受ける薄い梁を対象として構造モデル化を行い、ピエゾインピーダンス法により計測される電氣的インピーダンスから梁に加わる軸力を同定する手法の構築を行っている。本研究では、梁と同様に構造物の基本部材である板を対象として、ピエゾインピーダンス法を用いた二次元応力場の同定手法の構築を目的とする。具体的には、薄板に応力場を発生させる前後での電氣的インピーダンスの計測および計測結果から薄板に発生した二次元の応力場分布を同定する逆解析手法の構築を行う。

3. 応力同定手法

板の場合は、一般的な境界条件に対して解析的な取り扱いが困難であるので、次式のように有限要素モデルにより構造モデルの定式化を行った。

$$\begin{bmatrix} [K_{uu}] - \omega^2 [M] & [K_{u\phi}] \\ [K_{u\phi}]^T & [K_{\phi\phi}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\hat{u}\} \\ \{\hat{\phi}\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{\hat{f}_u\} \\ \{\hat{f}_\phi\} \end{Bmatrix}$$

キーワード モニタリング, 圧電素子, 電氣的インピーダンス, 逆解析, 板

連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻橋梁研究室 TEL 03-5841-6099

ここで、 $[K_{uu}]$ は剛性マトリクス、 $[K_{u\phi}]$ は力学的特性および電気的特性が連成するマトリクス、 $[K_{\phi\phi}]$ は電気ポテンシャルマトリクス、 $[M]$ は質量マトリクス、 $\{\hat{u}\}$ は変位ベクトル、 $\{\hat{\phi}\}$ は電気ポテンシャルベクトル、 $\{\hat{f}_u\}$ は外力ベクトル、 $\{\hat{f}_\phi\}$ は電荷ベクトル、 ω は印加する交流電圧の周波数をそれぞれ表す。周波数 ω はパラメータとして与えられるので、上式を各周波数に対して解く必要がある。板に加わる面内力の効果は、幾何学的非線形効果に基づく初期応力項として剛性マトリクスに含まれており、幾何学的非線形効果を含めた後に、調和振動解析を行う。この考え方は、音弾性と同様なものである²⁾。このモデルでは、非線形有限要素法の定式化にUpdated Lagrange法を用いた。また要素は、薄い板の曲げ問題で生じるシェアロッキングを避けるために 27 節点ソリッド要素を用いている。板の応力状態を同定するためには、初期応力の効果をパラメータとして与え、解析結果を実験結果にフィッティングさせることで逆解析を行う。

4. 実験による応力同定手法の検証

今回の実験に供試体として用いたアルミニウムと圧電素子の幾何形状および物性値をそれぞれ表-1、表-2 に示す。圧電素子は、アルミニウムの板の中央部にシアノアクリルレート系の接着剤で接着した。圧電素子は、市販のもの表-1 に示す幾何形状に切り出し、圧電素子の片方の表面にリード線をはんだ付けし、もう一方のリード線を板に直接貼り付けた。印加した交流電圧は 10 [V]であり、インピーダンスアナライザーにより交流電圧の周波数を連続的に変化させた。周波数の変化幅は 10 [Hz]とした。作成した供試体は、図-2 のように天井から吊るし、下端部に重りを下げることで応力を加えることにした。用いた重りは、20 [kgf]である。

板に応力を加える前後での計測結果と構築した FEM モデルによる解析結果の比較を図-3 に示す。応力は板に対して軸方向に加えている。図-3 から解析結果は、実験結果と十分には一致していないことがわかる。この理由としては、実験において供試体は天井から吊り下げられたため境界条件が明確ではないことがあげられる。境界条件を明確に評価することが可能な実験を行うことが必要であり、このためには 3 軸のレーザー速度形により境界条件を計測して解析に組み込むなどが考えられ、今後の課題である。

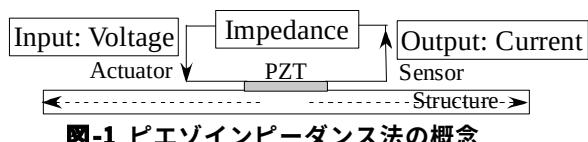


図-1 ピエゾインピーダンス法の実験構成

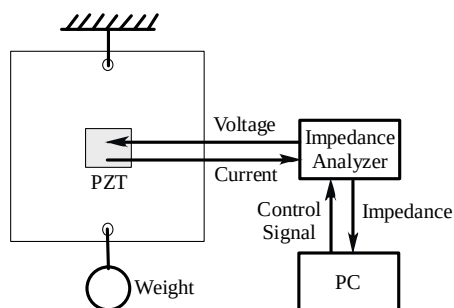


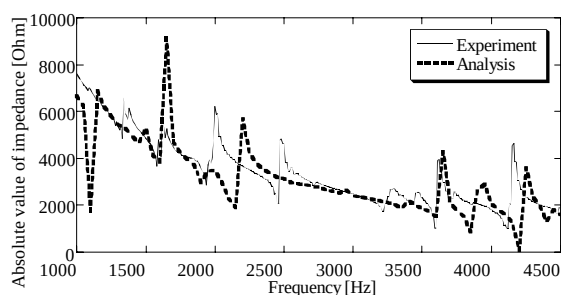
図-2 計測システム

表-1 供試体の幾何形状 単位 [mm]

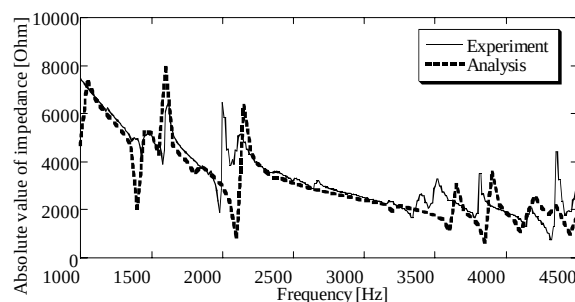
	Width	Thickness	Length
Aluminum	10.0	0.5	10.0
PZT	20.0	0.267	20.0

表-2 供試体の材料特性

Composition	PZT Pb(Zr,Ti)O ₃	Aluminum
Young's modulus [N/m ²]	6.6×10 ¹⁰	6.9×10 ¹⁰
Density [kg/m ³]	7840	2700
Poisson's ratio	0.310	0.345
Piezoelectric strain coefficient [m/V]	-1.90×10 ⁻¹⁰	—
Permittivity [F/m]	1.60×10 ⁻⁸	—



(a) 応力なし



(b) 応力あり

図-3 板の実験結果と解析結果の比較

参考文献

- 1) 宮下剛, 阿部雅人, 藤野陽三: ピエゾインピーダンス法による梁の張力同定, 土木学会論文集, No. 710/I-60, pp. 373-384
- 2) Joseph L. Rose: Ultrasonic Waves in Solid Media., Cambridge University Press., 1999.