

圧電セラミックスを用いたボルト継手部の定量的ヘルスマニタリング

Quantitative Health Monitoring of Bolted Joints Using Piezoceramics Actuator-Sensor

阿部雅人*, 宮下剛**, Sopon Ritdumrongkul ***

Masato ABE, Takeshi MIYASHITA, Sopon Ritdumrongkul

*Ph. D. 東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 助教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

** 工修 東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

*** 工修 東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

This paper presents the use of piezoceramics (PZT) actuator-sensor to quantitatively detect damage of bolted joints. Basic principle of this technique is to utilize high-frequency excitation through surface-bonded PZT actuator-sensor to detect changes in structural properties due to damage. The structure used in this study consists of two aluminum beams connected by a bolted joint. Damage is simulated by loosening of the bolts. To quantitatively monitor the damage, a numerical model of the structure is formulated by using spectral element method (SEM). A bonded-PZT beam and a bolted joint element are developed. Experimental results show the ability of this method to detect the damage. By using the proposed model, the loosening of bolts can be quantitatively identified as the change in stiffness and damping at the bolted joint.

Key Words: quantitative health monitoring, piezoceramic, bolted joint, spectral element method

1. はじめに

数多くの非破壊評価手法が開発されており、構造ヘルスマニタリングに適用されている。これらの手法の中で、圧電セラミックス (PZT, 組成: チタンジルコン酸鉛) をアクチュエータかつセンサとして用いることで、構造物の損傷を検出する手法がある。この手法では、PZT 素子を構造物に貼り付ける。構造物の機械的インピーダンスに関係する PZT 素子の電氣的インピーダンスを計測することにより、損傷に基づく剛性や減衰という構造物の特性量の変化を検出することが可能となる。この手法のメリットとして、オンライン化による連続的なモニタリングが可能である点が挙げられる。電氣的インピーダンスの計測を高周波数領域で行うので、PZT 素子が発生する波動の波長は短く、損傷をモニタリングするには十分な感度を有している。また、PZT 素子は小型であるため通常は接近が困難である箇所をモニタリングするために用いることが可能であり、質量の付加的な影響は無視することができる。

本手法の実験的な研究は、トラス構造物¹⁾や合成補強コンクリート壁²⁾、RC 橋の模型³⁾のような構造物に対して、継続的に行われている。しかし、これら多くの研究では、構造モデルに基づいていないため、定性的なヘルスマニタリングしか行われていない。このため、計測されるインピーダンスの変化と構造物特性の変化を関係付けることができず、損傷の性質に関して限定された情報しか得られて

ない。近年、宮下⁴⁾が軸力を受ける薄い梁の定量的なヘルスマニタリングにこの手法を適用した。定量的にヘルスマニタリングを行うことは、定性的に行うよりも一般的に困難である。なぜなら、定量的なヘルスマニタリングを行うためには、構造物の特性と損傷を定量的に関係付ける構造物の正確なモデル化が必要となるからである。

本研究の目的は、PZT 素子をアクチュエータかつセンサとして用いて、ボルト接合部の定量的な構造ヘルスマニタリング手法を開発することである。ボルト接合は、構造物の接合部に用いられ、構造物の中で最も重要な部分である。ボルトが緩み、接合部の剛性が減少することで、構造物としての機能が失われてしまう。そのため、ボルト接合部をリアルタイムにモニタリングすることは、ボルト接合が用いられている多くの構造物の信頼性および安全性を改善することに結びつく。また、構造物は、張力のような外力に対して抵抗するように設計される。ボルト接合部および PZT 素子の動的特性は、張力の影響により変化する。しかし、張力の効果を含むボルト接合部の動的特性に関する研究は、これまで行われていない。

PZT 素子が貼り付けられた構造物の多くのモデル化は、解析的モデル^{5), 6)}や有限要素モデル^{8), 9)}により行われている。多くのモデルが存在するにも関わらず、実構造物に適用することは困難である。この理由として、モデル化における仮定やモデルの数学的な複雑さが理由として挙げられる。近年、Lee, Kim¹⁰⁾がスペクトル要素法 (SEM)¹¹⁾

を用いた PZT 素子が貼り付けられた梁のモデル化を行った。通常の有限要素法とは異なり、スペクトル要素法では支配方程式の厳密解に基づく形状関数を用いる。そのため、構造要素内の質量分布を厳密に取り扱うことにより、構造物の正確な動的特性を表すことが可能である。FEM との大きな相違点として、SEM ではフーリエ変換および逆フーリエ変換を用いることが挙げられる。これにより、高周波数領域においても非常に精度の良い解が得られることが知られている。

ボルト接合部に関する構造モデル化は、多くの研究が行われている^{13),14),15),16)}。しかし、振動の低次モードのみに着目しているものが大部分である。SEM によりボルト接合部のモデル化を行い、高周波数領域を扱った研究として、Esteban, Rogers¹⁶⁾によるものがある。SEM では高周波数領域まで精度良く扱うことが可能であるため、本研究では構造モデル化の定式化に SEM を用いる。具体的には、PZT 素子が貼り付けられた梁およびボルト接合部のモデル化を行う。次いで、ボルトの緩みを構造モデルの剛性および減衰の変化に結びつける。

本論文の初めの部分では、PZT 素子をアクチュエータかつセンサとして利用した構造ヘルスマニタリング手法の原理および実験について述べる。ついで、PZT 素子が貼り付けられた梁およびボルト接合部の構造モデルについて述べる。最後に、実験結果と構造モデルによる結果を比較することで、本手法の妥当性を検証する。

2. PZT 素子を用いた構造ヘルスマニタリング手法の原理

PZT 素子をアクチュエータかつセンサとして用いるヘルスマニタリング手法では、PZT 素子の電気的特性と機械的特性が連成する性質を利用する。この特性には、圧電効果および逆圧電効果がある。圧電効果は、PZT 素子が機械的な応力を受けることで電荷を発生するというものである。また、逆圧電効果は、PZT 素子が印加される電場に応じて機械的なひずみを発生するというものである。PZT 素子の構成式は、次のような線形関係で表現される¹⁷⁾。

$$S_i = s_{ij}^E T_j + d_{mi} E_m \quad (1)$$

$$D_m = d_{mi} T_i + \epsilon_{mk}^T E_k$$

ここで、 S は機械的ひずみ、 T は機械的応力、 E は電場、 D は電気変位、 s は機械的コンプライアンス、 d は圧電ひずみ定数、 ϵ は誘電率をそれぞれ表す。また、下付きの i, j, m, k は応力およびひずみ、電場の方向をそれぞれ表す。式 (1) の第一式は、逆圧電効果を表し、第二式は圧電効果を表す。

PZT 素子は、圧電効果によりセンサとして機能し、また、逆圧電効果によりアクチュエータとして機能する。さらに、センサおよびアクチュエータとして同時に機能させることも可能である。PZT 素子をセンサかつアクチュエータとして利用することにより、システムの構成要素が減少することから、センサおよびアクチュエータを分離して単独で用いるよりも効果的であると言える。

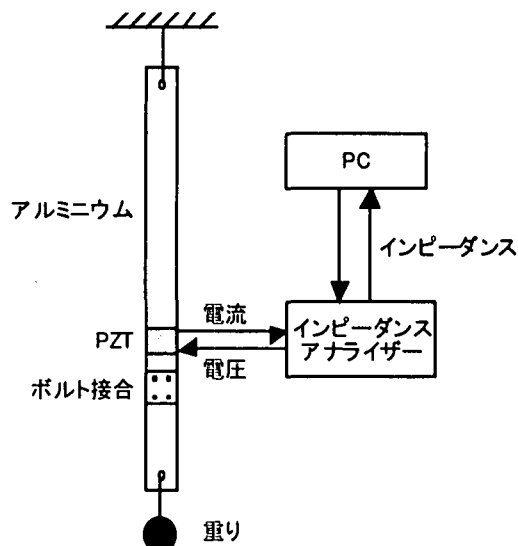


図-1 実験

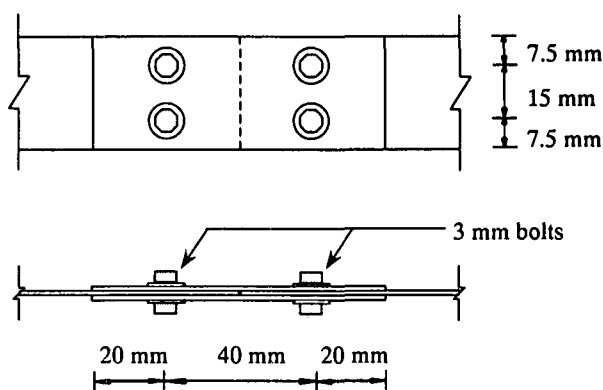


図-2 ボルト接合部の詳細

PZT 素子をアクチュエータかつセンサとして用いる場合、初めに、構造物に貼り付けた PZT 素子に交流電圧を印加する。これにより、PZT 素子は逆圧電効果に基づいた微小な変形を発生し、構造物を振動させる。ついで、構造物が振動すると、PZT 素子は圧電効果に基づき電流を発生する。インピーダンスアナライザにより、印加する交流電圧の周波数を変化させて、電圧と電流の比である電気的インピーダンスを計測する。構造物の応答は、剛性や減衰のような構造物の特性に影響される。そのため、損傷に基づいて発生するこれら特性量の変化は、構造物の応答変化に結びつき、電気的インピーダンスが変化する。結果として、電気的インピーダンスの変化を計測することにより、構造物の損傷に関する情報が得られることになる。

3. 実験

本研究で行った実験装置を図 1 に示す。ボルト接合部を含む供試体にはアルミニウムを用い、天井から吊り下げた。供試体の全体の長さは、1[m]であり、断面形状は 30[mm] × 1[mm]である。図 2 にボルト接合部の詳細を示す。ボルト接合部は、両面突合せ継手であり、下端部から 0.25[m]の位置にある。ワッシャーとナットからなる鋼製の 3[mm] ボルトを 4 つ用いた。ボルト接合部分の全体の長さは、80

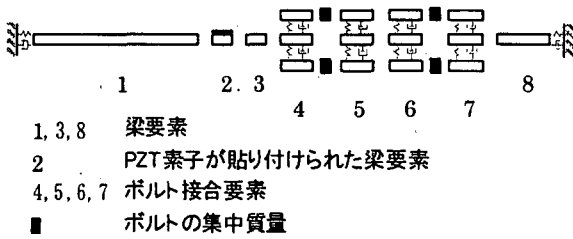


図-3 ボルト接合部を有する構造物の構造モデル

[mm]である。PZT素子の形状は、30 [mm]×35 [mm]であり、シアノアクリレート系接着剤によりボルト接合部から2.5 [cm]離れた場所に貼り付けた。PZT素子の幅は、リード線を直接結びつけるために供試体の幅よりも大きくした。

ボルト接合部の損傷は、トルクレンチを用いてボルトを緩めることにより人工的に与えた。ボルトに導入するトルクは、20 [cNm] から 0 [cNm] (完全に緩んだ状態) の範囲で与えることにした。与えるトルクの値は、ボルトの寸法が小さいので見かけ上小さくなっている。しかし、実際にボルトに導入される最低の軸力の値¹⁷⁾を本研究で用いたボルトに換算してトルクを求めると、3 [cNm] であり、実際にボルト部分に導入される軸力の範囲内にある。

実験では、図1に示すように5, 10, 15 [kgf]の重りを下げることで張力を与えた。ついで、インピーダンスアナライザーによりPZT素子に10 [V]の交流電圧を印加して交流電圧の周波数を変化させ、各周波数において電氣的インピーダンスの計測を行った。変化させた周波数の範囲は、500～2500 [Hz]である。周波数ステップは500～1000 [Hz]において5 [Hz]、1000～2500 [Hz]において10 [Hz]である。入力電圧と出力電流から、電氣的インピーダンスが計測される。本研究では、構造物の特性の変化を調べるために、ボルトに加える軸力の値およびトルクの値を変化させて電氣的インピーダンスの計測を行った。

4. モデル化

実験で用いたボルト接合部の構造モデル化にはスペクトル要素法を用いた。この手法は、質量分布を正確に取り扱うので、接合部間の精度を失うことなく一つの要素で表現することが可能である。そのため、図3に示されている構造物をモデル化するためには8要素のみで十分ある。構造モデルは、1次元を仮定しており、梁要素、PZT素子が貼り付けられた梁の要素、ボルト接合部要素から成る。スペクトル要素法の体系化は、Doyle¹¹⁾により行われている。ここでは、PZT素子が貼り付けられた梁およびボルト接合部の定式化を行う。

4.1. PZT素子が貼り付けられた梁のモデル化

(1) 運動方程式

PZT素子が貼り付けられた梁の幾何形状および変形状

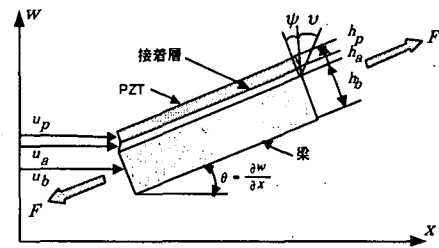


図-4 PZT素子が貼り付けられた梁の変形

態を図4に示す。梁の長さは L である。構造モデルは、PZT素子層、接着層、ベースとなる梁の部分から構成される。PZT素子が貼り付けられた梁の部分の構造モデルとして、LeeとKim¹⁰⁾の構造モデルに修正を加えたものを用いることにする。具体的には、本研究では接着層を弾性体とし、さらに静的な軸力 F を加えている。

図4において、 u_a 、 u_b 、 u_p は、それぞれベースとなる梁、接着層、PZT素子の中立軸における軸方向変位を表す。接着層と梁が完全に接着していると仮定すると、図4より次式のような力学的関係式が導出される。

$$u_a = u_b - (h_b + h_a)\theta / 2 + h_a\psi / 2 \quad (2)$$

$$u_p = u_b - (h_b + 2h_a + h_p)\theta / 2 + h_a\psi \quad (3)$$

ここで、 h は厚さ、下付きの b, a, p は、それぞれ梁、接着層、PZT素子の特性を表している。 θ は梁の回転角、 ψ は接着層のせん断角、 v は梁のせん断角を表している。1次元のPZTの構成式は、式(1)より次のように表される。

$$\begin{Bmatrix} \sigma \\ E \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11}^D & -h_{31} \\ -h_{31} & \beta_{33}^s \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon \\ D \end{Bmatrix} \quad (4)$$

ここで、 σ および ε はそれぞれ x 方向の力学的な応力およびひずみ、 D は電荷密度、 E は電場、 C_{11}^D は(PZT素子の)弾性定数、 β_{33}^s は誘電的定数、 h_{31} は圧電定数である。式(4)の構成式を用いることにより、図4に示された系の運動エネルギー T 、ひずみエネルギー V および仮想仕事の変分 δW が次のように得られる。

$$T = \frac{1}{2} \int_0^L \left\{ \rho_b A_b (\dot{u}_b^2 + \dot{w}^2) + \rho_a A_a (\dot{u}_a^2 + \dot{w}^2) + \rho_p I_a (\dot{w}' - \dot{\psi})^2 + \rho_p A_p (\dot{u}_p^2 + \dot{w}^2) \right\} dx \quad (5)$$

$$V = \frac{1}{2} \int_0^L \left\{ E_b A_b u_b'^2 + E_b I_b w''^2 + E_a A_a u_a'^2 + E_a I_a (w'' - \psi')^2 + A_a G \psi^2 + C_{11}^D A_p u_p'^2 + C_{11}^D I_p w''^2 - 2A_p h_{31} D u_p' + A_p \beta_{33}^s D^2 \right\} dx \quad (6)$$

$$\delta W = \int_0^L \left\{ bV(t)\delta D - \eta_b A_b (\dot{u}_b \delta u_b + \dot{w} \delta w) - \eta_a A_a (\dot{u}_a \delta u_a + \dot{w} \delta w + \dot{\psi} \delta \psi) - \eta_p A_p (\dot{u}_p \delta u_p + \dot{w} \delta w + F w'' \delta w) \right\} dx + \bar{N} \delta u_b \Big|_0^L + \bar{M} \delta \theta \Big|_0^L + \bar{Q} \delta w \Big|_0^L + \bar{R} \delta \psi \Big|_0^L \quad (7)$$

ここで、 E, I, A, b, ρ はそれぞれの層における、ヤング率、中立軸に関する断面 2 次モーメント、断面積、幅、質量密度を表す。また、 $'$ は x に関する微分を、 $\cdot$ は t に関する微分を表す。材料減衰 η は、次の値を用いることにする¹¹⁾。

$$\eta = \rho \omega_0 \times 10^{-3} \quad (8)$$

ここで、 ω_0 は適用する周波数範囲の平均値である。また、 G は接着層のせん断弾性定数である。 N, M, Q, R はそれぞれ u_b, θ, w, ψ に対応した境界における合応力および合モーメントである。 $V(t)$ は PZT に印加する電圧であり、 F は静的な軸力である。式 (2) および式 (3) を用いて式 (5)~(7) から軸方向変位 u_a, u_p を消去し、ハミルトンの原理にエネルギーを代入すると、軸、曲げ、せん断の効果が連成する運動方程式が以下のように得られる。

$$\begin{aligned} EI_w w'''' + \rho A \ddot{w} + \eta A \dot{w} \\ = -\alpha \ddot{u}_b' + \beta u_b''' + \gamma \ddot{w}'' - \varepsilon_1 \dot{\psi}' + \varepsilon_2 \psi''' + \xi_1 \dot{w}'' - \xi_2 \dot{u}_b' \\ - \xi_3 \dot{\psi}' + F w'' \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} EA u_b'' - \rho A \ddot{u}_b - \eta A \dot{u}_b \\ = -\alpha \dot{w}' + \beta w''' + \varepsilon_3 \dot{\psi} - \varepsilon_4 \psi'' - \xi_2 \dot{w}' + \xi_4 \dot{\psi} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} EI_\psi \psi'' - \rho I \ddot{\psi} - \xi_5 \dot{\psi} \\ = -\varepsilon_1 \dot{w}' + \varepsilon_2 w''' + \varepsilon_3 \ddot{u}_b - \varepsilon_4 u_b'' - \xi_3 \dot{w}' + \xi_4 \dot{u}_b + A_a G \psi \end{aligned} \quad (11)$$

ただし、式 (9) ~ (11) における諸量は、以下の通りである。

$$\rho A = \rho_b A_b + \rho_a A_a + \rho_p A_p \quad (12)$$

$$\rho I = \rho_a I_a + \rho_a A_a h_a^2 / 4 + \rho_p A_p h_p^2 \quad (13)$$

$$\alpha = \rho_a A_a h_1 / 2 + \rho_p A_p h_2 / 2 \quad (14)$$

$$\beta = E_p A_p h_1 / 2 + E_p A_p h_2 / 2 \quad (15)$$

$$\gamma = \rho_a I_a + \rho_a A_a h_1^2 / 4 + \rho_p A_p h_2^2 / 4 \quad (16)$$

$$EA = E_b A_b + E_a A_a + E_p A_p \quad (17)$$

$$E_p = C_{11}^0 - h_{31}^2 / \beta_{33}^5 \quad (18)$$

$$EI_\psi = E_a I_a + E_a A_a h_a^2 / 4 + E_p A_p h_a^2 \quad (19)$$

$$EI_w = E_b I_b + E_a I_a + C_{11}^0 I_p + E_p A_p h_2^2 / 4 \quad (20)$$

$$\varepsilon_1 = \rho_a I_a + \rho_a A_a h_a h_1 / 4 + \rho_p A_p h_a h_2 / 2 \quad (21)$$

$$\varepsilon_2 = E_a I_a + E_a A_a h_a h_1 / 4 + E_p A_p h_a h_2 / 2 \quad (22)$$

$$\varepsilon_3 = \rho_a A_a h_a / 2 + \rho_p A_p h_a \quad (23)$$

$$\varepsilon_4 = E_a A_a h_a / 2 + E_p A_p h_a \quad (24)$$

$$\eta A = \eta_b A_b + \eta_a A_a + \eta_p A_p \quad (25)$$

$$\xi_1 = \eta_a A_a h_1^2 / 4 + \eta_p A_p h_2^2 / 4 \quad (26)$$

$$\xi_2 = \eta_a A_a h_1 / 2 + \eta_p A_p h_2 / 2 \quad (27)$$

$$\xi_3 = \eta_a A_a h_a h_1 / 4 + \eta_p A_p h_a h_2 / 2 \quad (28)$$

$$\xi_4 = \eta_a A_a h_a / 2 + \eta_p A_p h_a \quad (29)$$

$$\xi_5 = \eta_a A_a + \eta_a A_a h_a^2 / 4 + \eta_p A_p h_a^2 \quad (30)$$

$$h_1 = h_b + h_a \quad (31)$$

$$h_2 = h_b + 2h_a + h_p \quad (32)$$

境界条件は、ハミルトンの原理から次のように得られる。

$$N = \bar{N} + \bar{N}^p \text{ or } u_b = \bar{u}_b, \quad M = \bar{M} - \bar{M}^p \text{ or } \theta = \bar{\theta} \quad (33)$$

$$R = \bar{R} + \bar{R}^p \text{ or } \psi = \bar{\psi}, \quad Q = \bar{Q} \text{ or } w = \bar{w} \quad (34)$$

ここで、 N, M, Q, R は、それぞれ変位により定義される以下のような合応力および合モーメントである。

$$N = EA u_b' - \beta w'' + \varepsilon_4 \psi' \quad (35)$$

$$Q = -EI_w w''' - \alpha \ddot{u}_b + \beta u_b'' + \gamma \ddot{w}' - \varepsilon_1 \dot{\psi} + \varepsilon_2 \psi'' \quad (36)$$

$$M = EI_w w'' - \beta u_b' - \varepsilon_2 \psi' \quad (37)$$

$$R = EI_\psi \psi' - \varepsilon_2 w'' + \varepsilon_4 u_b' \quad (38)$$

式 (33) および式 (34) における $\bar{N}, \bar{M}, \bar{Q}, \bar{R}$ は境界において加えられる外力およびモーメントである。 $\bar{w}, \bar{u}_b, \bar{\theta}, \bar{\psi}$ は、境界で与えられる変位および回転角である。 N_p, M_p, R_p は、PZT に印加する電圧 $V(t)$ によって発生する圧電的な合力および合モーメントであり、次のように与えられる。

$$\bar{N}^p = b_p d_{31} E_p V(t) \quad (39)$$

$$\bar{M}^p = b_p d_{31} E_p h_2 V(t) / 2 \quad (40)$$

$$\bar{R}^p = b_p d_{31} E_p h_a V(t) \quad (41)$$

ここで、 d_{31} は $d_{31} = h_{31} / (E_p \beta_{33}^5)$ により定義される圧電ひずみ定数である。

(2) PZT 素子が貼り付けられた梁のスペクトル要素定式化

PZT 素子が貼り付けられた梁のスペクトル要素を式 (9) ~ (11) の一般解に基づいて定式化する。スペクトル要素による定式化は、Lee, Kim¹⁰⁾ により行われている。一般解は、スペクトル形式により次のように表される。

$$w(x, t) = \sum_n \hat{w}_n(x, \omega_n) e^{i\omega_n t} \quad (42)$$

$$u_b(x, t) = \sum_n \hat{u}_n(x, \omega_n) e^{i\omega_n t} \quad (43)$$

$$\psi(x, t) = \sum_n \hat{\psi}_n(x, \omega_n) e^{i\omega_n t} \quad (44)$$

ここで、 $\hat{w}_n, \hat{u}_n$ および $\hat{\psi}_n$ はそれぞれ曲げ変形、軸変形およびせん断角の空間に依存するフーリエ係数である。簡略化のために、式(42)~(44)で用いられている下付きの n は省略する。

式(42)~(44)を式(9)~(11)に代入して、共通する時間依存の項を省略すると、次のような $\hat{w}, \hat{u}$ および $\hat{\psi}$ に関する連成した 3 つの常微分方程式が得られる。

$$\begin{aligned} EI_w \hat{w}'''' - \omega^2 \rho A \hat{w} + i\omega \eta A \hat{w} \\ = \omega^2 (\alpha \hat{u}' - \gamma \hat{w}'' + \varepsilon_1 \hat{\psi}') + i\omega (\xi_1 \hat{w}'' - \xi_2 \hat{u}' - \xi_3 \hat{\psi}') \\ + \beta \hat{u}''' + \varepsilon_2 \hat{\psi}''' + F \hat{w}'' \end{aligned} \quad (45)$$

$$\begin{aligned} EA \hat{u}'' + \omega^2 \rho A \hat{u} - i\omega \eta A \hat{u} \\ = \omega^2 (\alpha \hat{w}' - \varepsilon_3 \hat{\psi}) - i\omega (\xi_2 \hat{w}' - \xi_4 \hat{\psi}) + \beta \hat{w}''' - \varepsilon_4 \hat{\psi}'' \end{aligned} \quad (46)$$

$$\begin{aligned} EI_\psi \hat{\psi}'' + \omega^2 \rho I \hat{\psi} - i\omega \xi_5 \hat{\psi} \\ = \omega^2 (\varepsilon_1 \hat{w}' - \varepsilon_3 \hat{u}) - i\omega (\xi_3 \hat{w}' - \xi_4 \hat{u}) + \varepsilon_2 \hat{w}''' - \varepsilon_4 \hat{u}'' + A_a G \hat{\psi} \end{aligned} \quad (47)$$

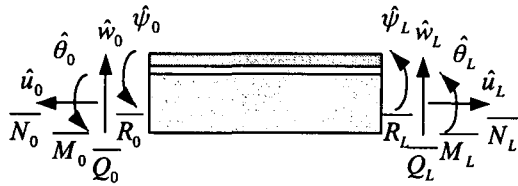


図-5 PZT 素子が貼り付けられた梁のスペクトル要素

ここで、 $\hat{w}, \hat{u}$ および $\hat{\psi}$ の解を次のように仮定する。

$$\hat{w}(x, \omega) = Ae^{-ikx} \quad (48)$$

$$\hat{u}(x, \omega) = Be^{-ikx} \quad (49)$$

$$\hat{\psi}(x, \omega) = Ce^{-ikx} \quad (50)$$

ここで、 A, B, C は定数である。 k は波数であり、式(48)～(50)を式(45)～(47)に代入して自明でない解を求めることにより決定される。結果として、 k は $\pm$ のペアとして8個得られることになる。 k を陽的に表現すると冗長であるため、ここでは示さないことにする。以上より $\hat{w}, \hat{u}$ および $\hat{\psi}$ の一般解は次のように表される。

$$\hat{w}(x, \omega) = \sum_{m=1}^4 (A_m e^{-ik_m x} + A_{2m} e^{ik_m x}) \quad (51)$$

$$\hat{u}(x, \omega) = \sum_{m=1}^4 (B_m e^{-ik_m x} + B_{2m} e^{ik_m x}) \quad (52)$$

$$\hat{\psi}(x, \omega) = \sum_{m=1}^4 (C_m e^{-ik_m x} + C_{2m} e^{ik_m x}) \quad (53)$$

係数 $A_m, B_m, C_m, A_{2m}, B_{2m}, C_{2m}$ の関係は、式(51)～(53)を式(45)～(47)に代入することによって得られる。これらの関係を用いることにより $\hat{w}, \hat{u}$ および $\hat{\psi}$ は A_m のみによって表されることになる。係数は、まず A_m が境界条件から決定され、 $B_m, C_m, A_{2m}, B_{2m}, C_{2m}$ が決まることになる。

図5に示されているPZT素子が貼り付けられた梁の節点力および節点変位の関係は次のようになる。

$$\{f\} = [s] \{y\} \quad (54)$$

ここで、

$$\{y\} = \{\hat{u}_0, \hat{w}_0, \hat{\theta}_0, \hat{\psi}_0, \hat{u}_L, \hat{w}_L, \hat{\theta}_L, \hat{\psi}_L\}^T \quad (55)$$

$$\{f\} = \{\bar{N}_0 - \bar{N}^p, \bar{Q}_0, \bar{M}_0 + \bar{M}^p, \bar{R}_0 - \bar{R}^p, \bar{N}_L + \bar{N}^p, \bar{Q}_L, \bar{M}_L - \bar{M}^p, \bar{R}_L + \bar{R}^p\}^T \quad (56)$$

である。 $\hat{u}, \hat{w}, \hat{\theta}, \hat{\psi}$ は、それぞれ軸および、曲げ、梁の回転角、接着層のせん断角に関する空間に依存したフーリエ係数である。下付きの0, L は要素の両端を表す。式(56)における $\bar{N}^p, \bar{M}^p, \bar{R}^p$ は、それぞれ次のように与えられる。

$$\bar{N}^p = b_p d_{31} E_p V(\omega) \quad (57)$$

$$\bar{M}^p = b_p d_{31} E_p h_2 V(\omega) / 2 \quad (58)$$

$$\bar{R}^p = b_p d_{31} E_p h_a V(\omega) \quad (59)$$

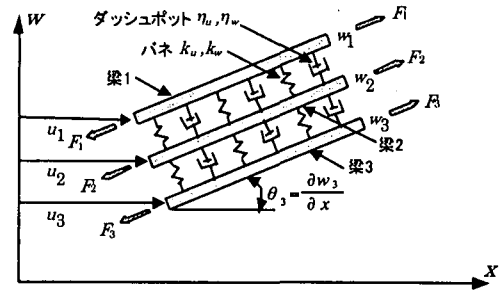


図-6 ボルト接合部の変形

マトリクス $[s]$ は、PZT 素子が貼り付けられた梁のスペクトル要素マトリクスであり、周波数に依存する。マトリクス $[s]$ の陽的な形式は、シンボリック演算により計算することが可能である。ただし、陽的な表現は、冗長であるためここでは示さないことにする。

4.2. ボルト接合部のモデル化

(1) 運動方程式

ボルト接合部は、3つの梁部材とし、均一に分布するバネおよびダッシュポットにより連結しているものとする。ボルト接合部の運動方程式は、次のように導出される。まず、図6に示す系の運動エネルギー T 、ひずみエネルギー V 、仮想仕事の変分 δW が以下のように得られる。

$$T = \frac{1}{2} \int_0^L \left\{ \rho_1 A_1 (\dot{u}_1^2 + \dot{w}_1^2) + \rho_2 A_2 (\dot{u}_2^2 + \dot{w}_2^2) + \rho_3 A_3 (\dot{u}_3^2 + \dot{w}_3^2) \right\} dx \quad (60)$$

$$V = \frac{1}{2} \int_0^L \left\{ E_1 A_1 u_1'^2 + E_1 I_1 w_1''^2 + E_2 A_2 u_2'^2 + E_2 I_2 w_2''^2 + E_3 A_3 u_3'^2 + E_3 I_3 w_3''^2 + K_u (u_1 - u_2)^2 + K_u (u_2 - u_3)^2 + K_w (w_1 - w_2)^2 + K_w (w_2 - w_3)^2 \right\} dx \quad (61)$$

$$\delta W = \int_0^L \left\{ -\eta_1 A_1 (\dot{u}_1 \delta u_1 + \dot{w}_1 \delta w_1) - \eta_2 A_2 (\dot{u}_2 \delta u_2 + \dot{w}_2 \delta w_2) - \eta_3 A_3 (\dot{u}_3 \delta u_3 + \dot{w}_3 \delta w_3) - \eta_u (\dot{u}_1 - \dot{u}_2) \delta (u_1 - u_2) - \eta_w (\dot{w}_1 - \dot{w}_2) \delta (w_1 - w_2) - \eta_u (\dot{u}_2 - \dot{u}_3) \delta (u_2 - u_3) - \eta_w (\dot{w}_2 - \dot{w}_3) \delta (w_2 - w_3) + F_1 w_1'' \delta w_1 + F_2 w_2'' \delta w_2 + F_3 w_3'' \delta w_3 \right\} dx + \bar{N}_1 \delta u_1 \Big|_0^L + \bar{N}_2 \delta u_2 \Big|_0^L + \bar{N}_3 \delta u_3 \Big|_0^L + \bar{M}_1 \delta \theta_1 \Big|_0^L + \bar{M}_2 \delta \theta_2 \Big|_0^L + \bar{M}_3 \delta \theta_3 \Big|_0^L + \bar{Q}_1 \delta w_1 \Big|_0^L + \bar{Q}_2 \delta w_2 \Big|_0^L + \bar{Q}_3 \delta w_3 \Big|_0^L \quad (62)$$

ここで、下付きの1, 2, 3はそれぞれ梁1, 2, 3を表す。 K_u, K_w はそれぞれ軸および曲げ方向に分布するバネ剛性を表す。 η_u, η_w はそれぞれ軸および曲げ方向に分布する減

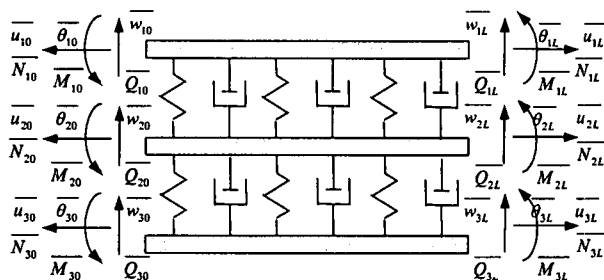


図-7 ボルト接合部のスペクトル要素

衰を表す。式 (60)~(62) をハミルトンの原理に代入すると、三つの梁の関して、以下のような連成した運動方程式が得られる。

$$E_1 A_1 u_1'' - \rho_1 A_1 \ddot{u}_1 - \eta_1 A_1 \dot{u}_1 - \eta_u (\dot{u}_1 - \dot{u}_2) - K_u (u_1 - u_2) = 0 \quad (63)$$

$$E_2 A_2 u_2'' - \rho_2 A_2 \ddot{u}_2 - \eta_2 A_2 \dot{u}_2 - \eta_u (\dot{u}_2 - \dot{u}_1) - \eta_u (\dot{u}_2 - \dot{u}_3) - K_u (u_2 - u_1) - K_u (u_2 - u_3) = 0 \quad (64)$$

$$E_3 A_3 u_3'' - \rho_3 A_3 \ddot{u}_3 - \eta_3 A_3 \dot{u}_3 - \eta_u (\dot{u}_3 - \dot{u}_2) - K_u (u_3 - u_2) = 0 \quad (65)$$

$$E_1 I_1 w_1'''' - \rho_1 A_1 \ddot{w}_1 + \eta_1 A_1 \dot{w}_1 + \eta_w (\dot{w}_1 - \dot{w}_2) + K_w (w_1 - w_2) - F_1 w_1'' = 0 \quad (66)$$

$$E_2 I_2 w_2'''' + \rho_2 A_2 \ddot{w}_2 + \eta_2 A_2 \dot{w}_2 + \eta_w (\dot{w}_2 - \dot{w}_1) + \eta_w (\dot{w}_2 - \dot{w}_3) + K_w (w_2 - w_1) + K_w (w_2 - w_3) - F_2 w_2'' = 0 \quad (67)$$

$$E_3 I_3 w_3'''' + \rho_3 A_3 \ddot{w}_3 + \eta_3 A_3 \dot{w}_3 + \eta_w (\dot{w}_3 - \dot{w}_2) + K_w (w_3 - w_2) - F_3 w_3'' = 0 \quad (68)$$

式 (63)~(65) は、三つの梁に関する軸方向の連成した運動方程式である。式 (66)~(68) は、曲げ方向に連成した運動方程式である。軸方向の運動方程式は、曲げ方向の運動方程式とは連成していない。

境界条件は、ハミルトンの原理より自然に導出され、次のように与えられる。

$$N_1 = \bar{N}_1 \text{ or } u_1 = \bar{u}_1, \quad N_2 = \bar{N}_2 \text{ or } u_2 = \bar{u}_2, \quad N_3 = \bar{N}_3 \text{ or } u_3 = \bar{u}_3 \quad (69)$$

$$M_1 = \bar{M}_1 \text{ or } \theta_1 = \bar{\theta}_1, \quad M_2 = \bar{M}_2 \text{ or } \theta_2 = \bar{\theta}_2, \quad M_3 = \bar{M}_3 \text{ or } \theta_3 = \bar{\theta}_3 \quad (70)$$

$$Q_1 = \bar{Q}_1 \text{ or } w_1 = \bar{w}_1, \quad Q_2 = \bar{Q}_2 \text{ or } w_2 = \bar{w}_2, \quad Q_3 = \bar{Q}_3 \text{ or } w_3 = \bar{w}_3 \quad (71)$$

ここで、 N, M, Q は、それぞれの梁に対して変位により以下のように定義される合応力および合モーメントである。

$$N_1 = E_1 A_1 u_1', \quad N_2 = E_2 A_2 u_2', \quad N_3 = E_3 A_3 u_3' \quad (72)$$

$$M_1 = E_1 I_1 w_1'', \quad M_2 = E_2 I_2 w_2'', \quad M_3 = E_3 I_3 w_3'' \quad (73)$$

$$Q_1 = -E_1 I_1 w_1''', \quad Q_2 = -E_2 I_2 w_2''', \quad Q_3 = -E_3 I_3 w_3''' \quad (74)$$

式 (72)~(74) で、 $\bar{N}, \bar{M}, \bar{Q}$ は境界での外力およびモーメントである。 $\bar{w}, \bar{u}, \bar{\theta}$ は境界での変位および回転角である。

(2) ボルト接合部のスペクトル要素定式化

ボルト接合部のスペクトル要素は、軸方向の自由度に対しては式 (63) ~ (65) により定式化される。また、曲げ方向の自由度に対しては式 (66) ~ (68) により定式化される。PZT 素子が貼り付けられた梁と同様にして、図 7 に示されるボルト接合要素の軸および曲げの自由度に対する力と変位のスペクトル関係式が次のように得られる。

$$\{f_u\} = [s_u] \{y_u\} \quad (75)$$

$$\{f_w\} = [s_w] \{y_w\} \quad (76)$$

ここで、 $[s_u]$ および $[s_w]$ はそれぞれ、ボルト接合部の軸および曲げの自由度に対するスペクトル要素マトリクスであり、周波数に依存している。ボルト接合部の全体剛性要素マトリクス $[s]$ は、FEM の場合と同じように、軸および曲げのスペクトル要素マトリクスを自由度について整理して足し合わせることで得られる。ボルト接合部では、ボルトの質量を図 3 に示したようにボルトの対応する位置に集中質量として与える。集中質量に関する剛性 s_b は次のように与えられる。

$$s_b = -m_b \omega^2 \quad (77)$$

この剛性をボルトの位置に対応する節点に軸方向および曲げ方向、回転の剛性として加える。供試体両端には、供試体を天井から吊るすために孔が存在している。この孔が境界条件に与える影響を考慮するために、軸および曲げ、回転変位に対応させて、境界の両端にバネおよびダッシュポットを与える。このとき、全系の方程式が、次のような形式で与えられることになる。

$$[S] \{Y\} = \{F\} \quad (78)$$

ここで、 $[S]$ は全体スペクトルマトリクス (あるいは全体動的剛性マトリクス)、 $\{Y\}$ は全自由度ベクトル、 $\{F\}$ は全体節点力ベクトルであり、全て周波数領域のものである。

4.3. 電氣的インピーダンスの計算

PZT 素子が力学的な変形に基づいて発生する電流は、次のように計算される⁴⁾。

$$\hat{I} = i\omega \left[\frac{d_{31}}{s_{11}^E} b_p \int \hat{S}_1 dx + b_p l_p \left(\epsilon_{33}^T - \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E} \right) \frac{V(\omega)}{h_p} \right] \quad (79)$$

ここで、 l_p は PZT の長さ、 S_1 は PZT の表面で発生する軸方向のひずみであり、図 4 の変形状態から定義され、次のように与えられる。

$$\hat{S}_1 = \hat{u}' - (h_b / 2 + h_a + h_p) \hat{\theta}' + h_b \hat{\psi}' \quad (80)$$

式 (80) を式 (79) に代入すると、次のような関係式が得られる。

$$\hat{I} = i\omega \left[\frac{d_{31}}{s_{11}^E} b_p \left\{ \hat{U} - (h_b/2 + h_a + h_p) \hat{G} + h_a \hat{P} \right\} + b_p l_p \left(\epsilon_{33}^T - \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E} \right) \frac{V(\omega)}{h_p} \right] \quad (81)$$

ここで、 $\hat{U}$, $\hat{G}$, $\hat{P}$ は PZT 素子が貼り付けられた梁の両端での軸方向の変形および回転角、せん断変形の差であり、次のように与えられる。

$$\hat{U} = \hat{u}_L - \hat{u}_0 \quad (82)$$

$$\hat{G} = \hat{\theta}_L - \hat{\theta}_0 \quad (83)$$

$$\hat{P} = \hat{\psi}_L - \hat{\psi}_0 \quad (84)$$

周波数領域における電気的インピーダンスは次のように計算される。

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{\hat{I}} \quad (85)$$

式 (85) は電気的インピーダンスの周波数応答関数である。本研究では、一定の電圧を印加しているの、式 (85) での $V(\omega)$ は一定電圧 V_0 となる。

5. 結果および議論

第3節で述べた実験装置を用いて、ボルトのトルクの値を変化させたときの電気的インピーダンスを計測した。その結果を図8に示す。ボルトのトルクの値が変化することにより、計測されたインピーダンスに変化が生じていることがわかる。図8に示されている電気的インピーダンスのピークは、対象とする系の共振を表している。ボルトにトルクを加えない(0 [cNm])場合は、ピークの高さは低く、ピークの位置が他のケースとは全く異なっている。2~6 [cNm] の範囲でトルクを加える場合では、インピーダンスの変化は小さい。しかし、ボルトを緩めると共振のピークが低周波数側に移動し、ピークの高さが減少することがわかる。インピーダンスの変化は、構造物の動的特性の変化に関係している。このため、通常の周波数応答関数のように、共振周波数の低下はボルト接合部分の剛性が減少したことによるものと言える。ピーク高さの減少は、ボルトを緩めたときにボルト接合部での摩擦に基づく減衰が増加することによるものである。剛性や減衰の変化は、構造モデルにより定量的に同定することが可能である。

張力が電気的インピーダンスに与える効果について検討する。図9(a)にボルトを完全に緩めた場合を示し、図9(b)に4 [cNm]のトルクをボルトに加えた場合を示す。張力を加えると、共振のピークが高周波側に移動する。これは、張力や圧縮力を加えることによって構造物内部を伝播する波動の波数が変化するためである。部材の剛性は、張力により大きくなり、圧縮力によって小さくなる。ボルトを完全に緩めた場合は、ピークの高さは張力を加えることでも増加する。これは、張力を加えることによって、ボルト接合部分の減衰が低下するためである。しかし、ボルト

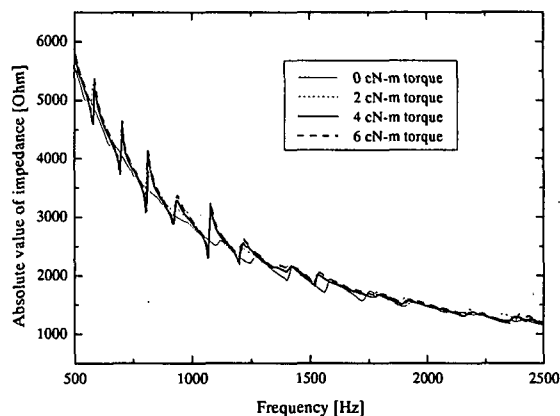


図-8 張力を加えない場合のインピーダンス計測結果

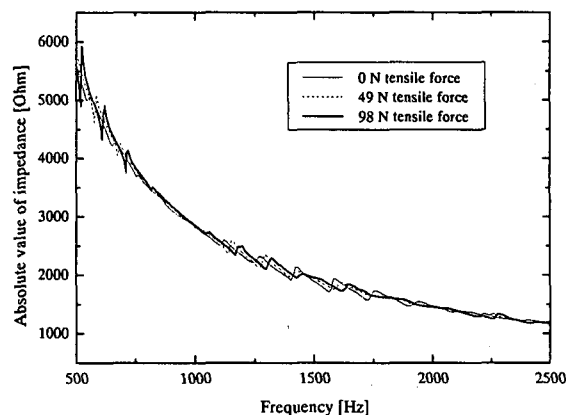


図-9(a) インピーダンス計測結果 (トルク : 0 cNm)

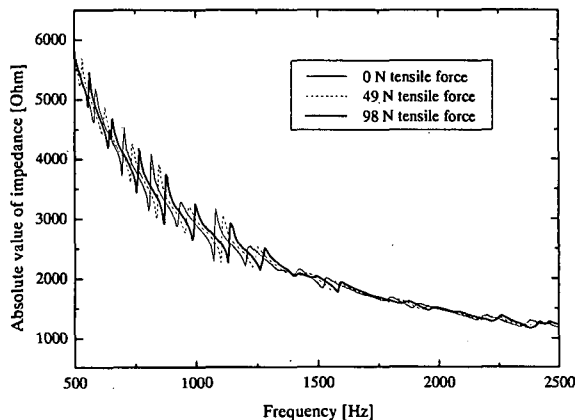


図-9(b) インピーダンス計測結果 (トルク : 4 cNm)

表-1 材料特性

Material property	PZT	Adhesive	Aluminum
E (N/m^2)	62.9×10^9	1.0×10^9	70.0×10^9
G (N/m^2)	-	3.68×10^8	-
b (m)	0.35	0.30	0.30
l (m)	0.30	0.30	-
h (m)	0.27×10^{-3}	0.02×10^{-3}	1.00×10^{-3}
ρ (kg/m^3)	7600	1100	2667
d_{31} (m/V)	-1.86×10^{-10}	-	-
ϵ_{33}^T (F/m)	1.59×10^{-8}	-	-
s_{11}^E (m^2/N)	1.59×10^{-11}	-	-

に加えるトルクが4 [cNm] の場合は、張力を加えたときのピーク高さに大きな変化は見られない。

損傷による構造物の特性の変化を定量的に同定するために、ボルト接合部のスペクトル要素モデルを図7のように構築した。PZT 素子および接着層、アルミニウムの材料特性を表1に示す。ボルト接合要素の張力 F_1, F_2, F_3 は、平衡状態において構造物に加えられている張力からそれぞれ計算することが可能である。それぞれのボルト接合部の軸方向および曲げ方向の変位に対する分布バネ剛性および減衰は、未知数とする。それらの値は、全てのボルト接合要素に対して均一とする。部材の両端の境界バネおよび減衰は、未知パラメータとし、これらの値は、両端で同一の値と仮定する。しかし、パラメータを変化させて調べた結果、ボルト接合部および構造物両端の軸方向のバネ剛性および減衰は、電気的インピーダンスの変化にほとんど影響を与えなかった。これは、式(82)における軸方向の変形 U のインピーダンスに対する寄与が非常に小さいためである。そのため、ボルト接合部および構造物両端の軸方向の剛性および減衰を無視することにした。これにより、ボルト接合部では、曲げ方向の剛性および減衰のみが考慮されることになる。以上により、設定される未知数は、ボルト接合部における曲げ方向の剛性および減衰、ボルト接合部を挟んだ両端部の梁における曲げ方向の剛性および減衰、回転方向の剛性および減衰、境界部における曲げ方向の剛性および減衰、回転方向の剛性および減衰である。これらの未知数を最適化手法によるパラメータフィッティングにより同定を行う。計測されたインピーダンスと構造モデルから計算されるインピーダンスを一致させるために、最適化手法である遺伝的アルゴリズム¹⁹⁾を用いた。フィッティングを行った計算結果として、図10に実験結果と共に示している。

同定された曲げ方向のバネ剛性および減衰を図11に示す。図11(b)より、ボルトを緩めることでバネ剛性が減少することがわかる。ボルトのトルクを20 [cNm] から4 [cNm] に減少させると、減衰がわずかに増加する。減衰は、トルクが2 [cNm] になると減少し、完全に緩んだ状態になると大きく増加する。完全に緩んだ状態では、バネ剛性が非常に小さく、減衰が他の場合よりも非常に大きくなっている。このため、このケースにおいて計測されたインピーダンスは、他のケースで計測されたインピーダンスとは大きく異なっている。ボルト接合部のバネ剛性および減衰は、ボルト接合部の接触圧力に依存していることがわかって¹⁹⁾いる。接触圧力は、トルクの値とボルト接合部の幾何形状から次のように計算される²⁰⁾。

$$p = \frac{n\tau}{\kappa d A} \quad (86)$$

ここで、 p, n, κ, d, A, τ はそれぞれ接触圧力、ボルトの総数、トルク係数、ボルトの直径、ボルト接合部の総面積、

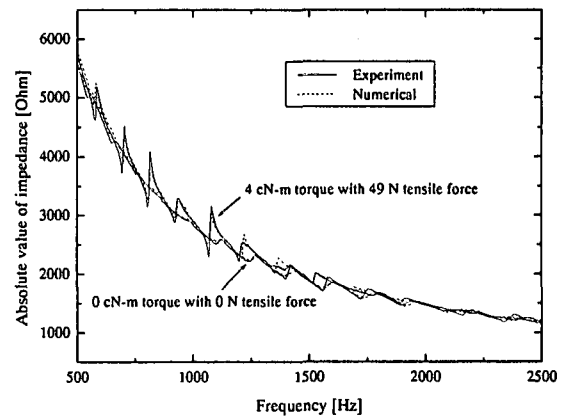


図-10 数値計算結果

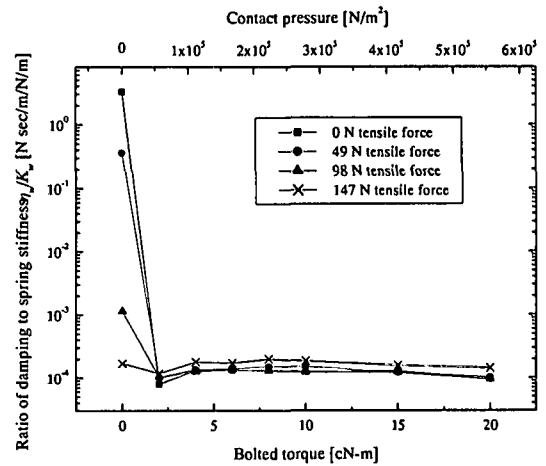


図-11(a) 同定されたバネ定数 K_w

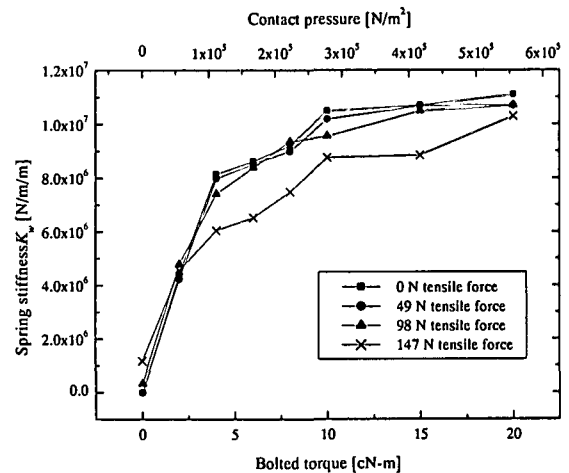


図-11(b) 同定された減衰 η_w

トルクの大きさを表す。トルク係数は通常0.2とする。接触圧力が同じであるボルト接合部において同定される値は、一般的なバネ剛性および減衰の値であると見なせる。この同定された剛性および減衰を用いて逆解析を行うことにより、計測される電気的インピーダンスから接合部におけるボルトのトルクの値を求めることが可能である。具体的には、初めに、対象とする実構造物のあるボルト接合部分に対して、本論文で提案した構造モデル化を行い、図11のような剛性とトルク値および減衰とトルク値の関係

の表を作成する。ついで、その接合部分のボルトに緩みが生じた場合は、緩みが生じたボルト接合部の電氣的インピーダンスを計測し、本論文で提案した手法によりボルト接合部分の剛性および減衰を同定する。最後に、予め作成してある表を参照することで、そのボルト接合部におけるトルクの値を求めることが可能である。以上により、ボルト接合部の健全性をリアルタイムで評価することが可能になる。しかし、同定された値の一般性についてはさらなる研究が必要である。

完全に緩めた場合では、張力によってバネ剛性が増加し、減衰が減少している。減衰が減少することにより、図8に示されているように共振ピークの高さが増加している。これは、接合部で全く摩擦抵抗力がないためである。そのため、張力が加えられることでボルト接合部が完全に伸びた状態になると、ボルトの耐力のみが張力に抵抗することになる。張力は接合部の剛性を増加させ、ボルトが自由に移動するのを妨げる。これにより、剛性の増加および減衰の減少がもたらされることになる。しかし、ボルトに加わるトルクの値が大きい場合は、張力によってバネ剛性が減少し、減衰がわずかに増加している。

6. 結論

PZT 素子をアクチュエータかつセンサとして利用するボルト接合部の定量的なヘルスマニタリング手法を提案した。本手法の基本的な原理は、対象とする系の構造モデル化を行い、損傷に基づいて変化する構造物の特性量を PZT 素子により計測される電氣的インピーダンスに基づいて逆解析手法から同定することである。損傷を定量的に同定するために、PZT 素子が貼り付けられた梁およびボルト接合部の構造モデルの定式化をスペクトル要素法 (SEM) により行った。小型供試体を用いた実験により、PZT 素子がボルトの緩みに基づく損傷を検出できることが示された。構造モデルを用いることにより、ボルトの緩みをボルト接合部でのバネ剛性および減衰の変化として定量的に同定することが可能となる。そのため、提案した手法を用いることにより、ボルト接合部の損傷を検出することが可能である。しかし、本手法を実構造物に適用するためには、同定された剛性および減衰の一般性や複雑な構造物への PZT 素子の適用性、環境が PZT 素子に対して与える効果についてさらなる研究が必要である。

参考文献

- 1) Sun, F. P., Chaudhry, Z., Liang, C. and Rogers, C. A. 1995. Truss structure integrity identification using PZT sensor-actuator. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. Vol. 6, pp. 134-139.
- 2) Park, G., Cudney, H. H. and Inman, D. J. 1999. Impedance-based health monitoring for civil structures. *2nd International Workshop on Structural Health Monitoring*. Stanford. CA, pp. 523-532.
- 3) Soh, C. K., Tseng, K. K-H., Bhalla, S. and Gupta, A. 2000. Performance of smart piezoceramic patches in health monitoring of a RC bridge. *Smart Materials and Structures*. Vol. 9, pp. 533-542.
- 4) Miyashita, T., Abe, M. and Fujino, Y. 2002. Structural health monitoring by piezo-impedance method. *IABSE Symposium 2002 Report*. Melbourne. Vol. 86, pp. 280-281.
- 5) Crawley, E. F. and de Luis, J. 1987. Use of piezoelectric actuators as elements of intelligent structures. *AIAA Journal*. Vol. 25, No. 10, pp. 1373-1385.
- 6) Chaudhry, Z. and Rogers, C. A. 1994. The pin-force model revisited. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. Vol. 5, pp. 347-354.
- 7) Crawley, E. F. and Lazarus, K. B. 1989. Induced strain actuation of isotropic and anisotropic plates. *AIAA Journal*. Vol. 29, No. 6, pp. 944-951.
- 8) Ha, S. K., Keilers, C. and Chang, F-K. 1992. Finite element analysis of composite structures containing distributed piezoceramic sensors and actuators. *AIAA Journal*. Vol. 30, No. 3, pp. 772-780.
- 9) Chen, C-Q., Wang, X-M. and Shen, Y-P. 1996. Finite element approach of vibration control using self-sensing piezoelectric actuators. *Computers and Structures*. Vol. 60, No. 3, pp. 505-512.
- 10) Lee, U. and Kim, J. 2001. Spectral element modeling for the beams treated with active constrained layer damping. *International Journal of Solids and Structures*. Vol. 38, pp. 5679-5702.
- 11) Doyle, J. F. 1997. *Wave Propagation in Structures: Spectral Analysis Using Fast Discrete Fourier Transforms, Second Edition*. Springer. New York.
- 12) Lee, U., Lee, J. 1997. Dynamic analysis of one and two-dimensional structures using spectral element methods. *Proc. Sixth International Conference on Recent Advances in Structural Dynamics ISVR*. University of Southampton. pp. 263-277.
- 13) Yoshimura, M. and Okushima, K. 1977. Measurement of dynamic rigidity and damping property for simplified joint models and simulation by computer. *Annals of the CIRP*. Vol. 25/1, pp. 193-198.
- 14) Wang, J. and Sas, P. 1990. A method for identifying parameters of mechanical joints. *Journal of Applied Mechanics*. Vol. 5, pp. 337-342.
- 15) Rao, M. D. and Crocker, M. J. 1990. Analytical and experimental study of the vibration of bonded beams with a lap joint. *Journal of Vibration and Acoustics*. Vol. 112, pp. 444-451.
- 16) Esteban, J. and Rogers, C. A. 2000. Energy dissipation through joints: theory and experiments. *Computers and Structures*. Vol. 75, pp. 347-359.

- 17) Tiersten, H. F. 1969. *Linear Piezoelectric Plate Vibrations: Elements of the Linear Theory of Piezoelectricity and the Vibrations of Piezoelectric Plates*. Plenum Press. New York.
- 18) Gaylord, E. H., Jr., Gaylord, C. N. and Stallmeyer, J. E. 1992. *Design of steel structures: Third edition*. McGraw-Hill, Inc. New York.
- 19) Jang, J-S. R., Sun, C-T. and Mizutani, E. 1997. *Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*. Prentice Hall. NJ.
- 20) Chen, W-H., Lee, S-S. and Yeh, J-T. 1995. Three-dimensional Contact stress analysis of a composite laminate with bolted joint. *Composite Structures*. Vol. 30, pp. 287-297.

(2003 年 4 月 18 日 受付)