

相反性を利用した多点加振による構造部材の振動の3次元可視化

愛媛大学 学生員 ○高橋栞太, 松本愛
愛媛大学 正員 中畑和之

1. はじめに

構造物の健全度を非破壊的に評価する方法として、MEMS 加速度センサを用いて多点同時計測を行い、構造部材の動的挙動を3次元可視化する手法がある¹⁾。損傷位置の同定や形状まで把握するには、高次のモードを利用する必要があるが、その場合はより多くのセンサを配置することになる。このとき、センサの個数が増えることによるコストの増大、有線でセンサを配置する場合は配線が複雑になる等のデメリットが考えられる。そこで、同一の系に対する相反定理²⁾を利用して、加振点と受信点の仕事量が等しいことによる2点間の関係式を導く。ここでは、一点加振多点計測の結果と、多点加振一点計測の結果が特定の方向で一致することを示す。多点加振一点計測を用いて固有振動数やモード形状を同定した研究は行われている³⁾が、振動時の動的挙動の3次元可視化まで拡張した例は著者らの調べたところ見当たらない。

本研究では、減肉のあるアルミニウム平板に対して、一点加振多点計測と多点加振一点計測の実験を行い、応答変位と3次元可視化結果を比較する。次に、本技術の損傷評価へ応用するための基礎検討として、可視化結果から減肉部を検出することを試みる。ここでは、減肉部でのみ振動が卓越する周波数を選択し、その前後で狭帯域のバンドパスフィルタを作用させることで、局所振動の可視化を行った事例を示す。

2. 相反定理

動弾性問題において、以下の運動方程式を満たす変位ベクトル \mathbf{u}^1 , \mathbf{u}^2 を考える。

$$\frac{\partial t_k^1}{\partial x_k} = -\rho\omega^2 \mathbf{u}^1 - \mathbf{f}^1 \quad (1)$$

$$\frac{\partial t_k^2}{\partial x_k} = -\rho\omega^2 \mathbf{u}^2 - \mathbf{f}^2 \quad (2)$$

ここで、応力テンソルを τ_{kl} 、基準座標系を示す単位ベクトルを \mathbf{e}_l とすると $t_k = \tau_{kl} \mathbf{e}_l$ である。また、 ρ は密度、 ω は角周波数、 \mathbf{f} は物体力である。上式(2)に、 \mathbf{u}_2 と \mathbf{u}_1 をそれぞれ作用させて積分し、ガウスの発散定

理を適用すると

$$\int_V (\mathbf{f}^1 \cdot \mathbf{u}^2 - \mathbf{f}^2 \cdot \mathbf{u}^1) dV = \int_S (t_k^2(n_k) \cdot \mathbf{u}^1 - t_k^1(n_k) \cdot \mathbf{u}^2) dS \quad (3)$$

を得る。ここで物体力を無視すれば、式(3)は、

$$\begin{aligned} \tau_{kl}^2 n_k u_l^1 &= \tau_{kl}^1 n_k u_l^2 \\ t_l^2 u_l^1 &= t_l^1 u_l^2 \end{aligned} \quad (4)$$

となり、相反関係が得られる。

3. 計測方法

一点加振多点計測と多点加振一点計測の応答波形を比較するための検討を、図-1(a)に示す装置を用いて行った。インパクトハンマ(富士セラミックス社製 FHA2KC, 感度: 2.2 mV/N) で一定の加振力で励起するために、図-1(b)のような加振器を製作した。加振器を用いて加振を行い、3軸加速度センサ(富士セラミックス社製 SA11ZSCA, レンジ: $\pm 5000 \text{ m/s}^2$, 感度: 1.0 mV/(m/s²))により加速度を測定した。加振時の入力とセンサで受信した加速度は、サンプリングレート 10 kHz で A/D 変換し、ノート PC に送られる。ノイズを除去するため、加速度波形に低域カットオフ周波数 100 Hz, 高域カットオフ周波数 25000 Hz のバンドパスフィルタを作用させた。その後、加速度を数値積分し、変位に変換した。

図-2(a)に示すように、四分位点が減肉しているアルミニウム(縦波音速 $C_L = 6300 \text{ m/s}$, 横波音速 $C_T = 3100 \text{ m/s}$, 密度 $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$) 平板を試験体として用いた。44 mm 間隔で 45 点に計測点を設け、多点加振一点計測を行った。次に、同じ点で、加振点と受信点を入れかえることで一点加振多点計測を行った。それぞれの計測点を図-2(b), (c) に示す。

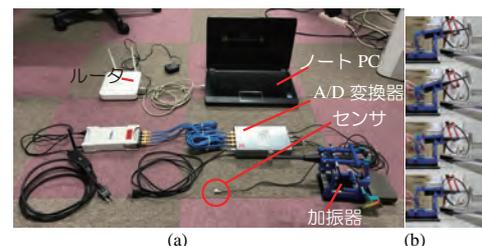


図-1 (a) 計測装置と (b) 加振器

Key Words: 多点加振, 一点受信, 振動, 可視化, 相反定理

〒790-8577 愛媛県松山市文京町3 愛媛大学大学院理工学研究科生産環境工学専攻, FAX 089-927-9840

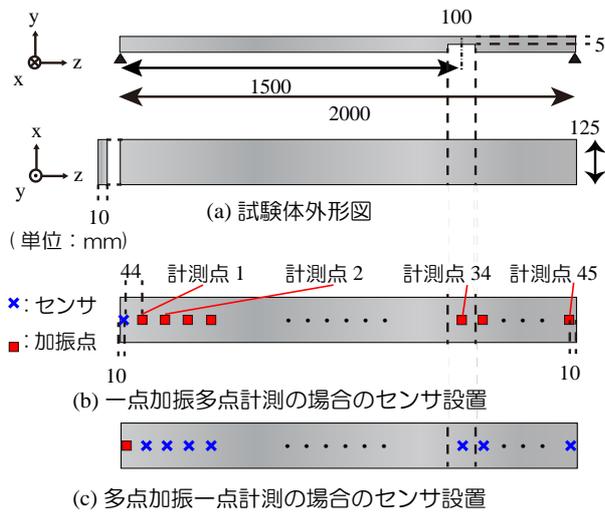


図-2 試験体の外形図およびセンサ設置位置

4. 相反定理を利用した振動の可視化

図-3 に計測点番号 15 において x, y, z 方向の応答変位と応答スペクトルを示す。また、送信と受信を入れ替えた場合の波形も同時に示す。なお、全計測点での応答変位の中で最大となる振幅で変位を正規化している。この結果、 y 方向の応答変位が良好に一致したが、 x と z 方向は差異がみられた。これは次のように考えられる。式 (4) の相反関係を成分表示すると、以下のようになる。

$$t_x^2 u_x^1 + t_y^2 u_y^1 + t_z^2 u_z^1 = t_x^1 u_x^2 + t_y^1 u_y^2 + t_z^1 u_z^2 \quad (5)$$

いま、加振力 $t_y \gg t_x, t_z$ なので、 $t_x/t_y \ll 1, t_z/t_y \ll 1$ と仮定できる。また、加振力は一定のため $t_y^1 = t_y^2$ なので、上式は

$$u_y^1 = u_y^2 \quad (6)$$

となる。従って、 y 方向の変位が等しくなることが相反性から導かれるが、その他の方向の変位については、この加振方法では等しくなることは保証されない。また、一点加振多点計測と多点加振一点計測によって振動による変形 u を可視化した結果を図-4 に示す。計測点間には、3 次のスプライン補間を用いている。多点計測一点加振と一点計測多点加振による 3 次元可視化はよい近似が得られている。

5. 減肉部の検出

図-5(a) から、減肉位置である計測点 34 でのパワースペクトルが他の計測点よりも大きいことが確認できた。そこで、3340~3350 Hz でバンドパスフィルタを作用させ可視化した結果を図-5(b) に示す。この結果から、減肉部が局所振動している様子が見て取れる。今

後は、この局所振動を詳細に検討していくことで、減肉部だけでなくき裂などの損傷についても評価できるかを探っていきたい。

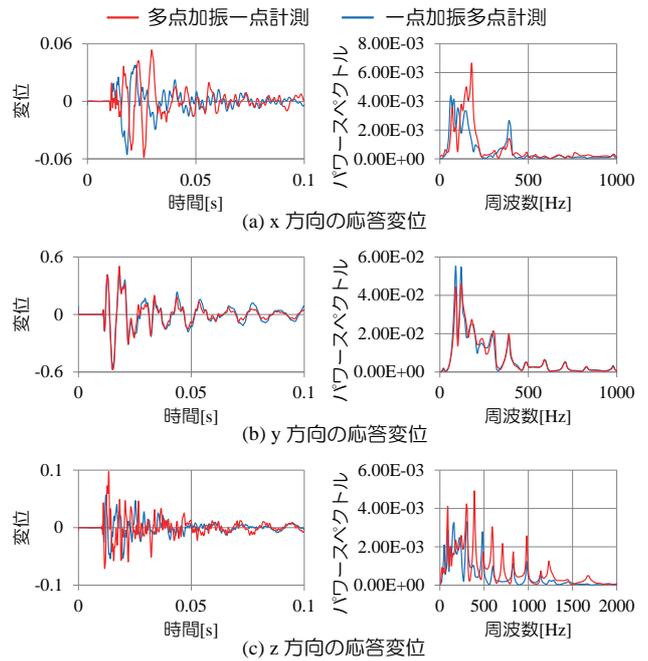


図-3 計測点 15 での応答変位波形と応答スペクトルの比較

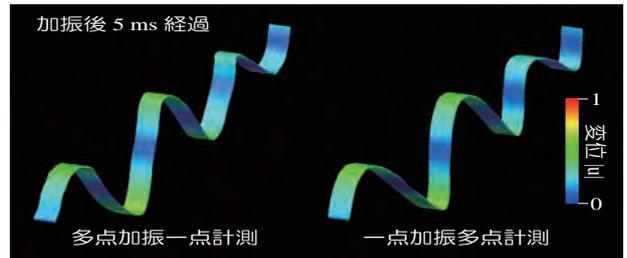


図-4 振動の可視化

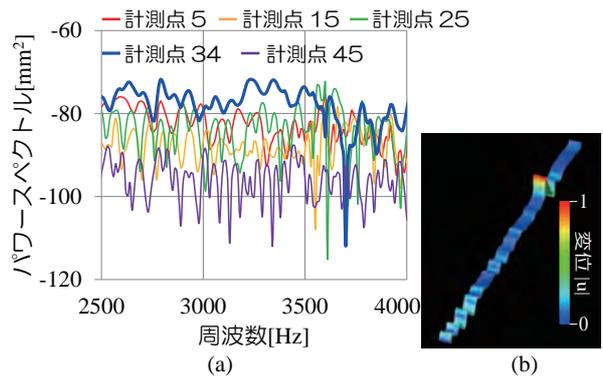


図-5 (a) パワースペクトルおよび (b) 局所振動の可視化

参考文献

- 川原正人, 中畑和之, 大賀水田生: 多点同時計測による橋梁床板の動的挙動の 3 次元可視化と歩道橋における実験的検証, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.1170-1178, 2013.
- L.W. Schmerr: *Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation*, Plenum Press, New York, 1998.
- 松岡弘大, 貝戸清之, 徳永宗正, 曾我部正道: インパルスハンマーによる多点加振を用いた部材振動特性の同定, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.955-960, 2011.