愛媛大学大学院 学生員 〇高橋栞太. 松本愛 愛媛大学大学院 正会員 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、より高次の モードを利用する必要が生じるが、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の取り回しが複雑になる等 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,加振点と受信点の仮想仕 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、構造部材の損傷評価を意 図して,振動時の動的挙動の3次元可視化までを検証 した例は、著者らの調べたところ見当たらない.

本研究では多点加振一点計測を行い構造部材の3次 元可視化を試みる. ここでは、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、応答変位を比較する.次に、多点 加振一点計測を用いた場合の振動の可視化を行う. ま た,将来の損傷評価への応用を意図して,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.

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 u^1 , u^2 を考える.

$$\frac{\partial \boldsymbol{t}_{k}^{1}}{\partial x_{k}} = -\rho\omega^{2}\boldsymbol{u}^{1} - \boldsymbol{f}^{1} \\
\frac{\partial \boldsymbol{t}_{k}^{2}}{\partial x_{k}} = -\rho\omega^{2}\boldsymbol{u}^{2} - \boldsymbol{f}^{2}$$
(1)

ここで、応力テンソルを Tkl,基準座標系を示す単位 ベクトルを e_l とすると $t_k = \tau_{kl} e_l$ である.また、 ρ は 密度, ω は角周波数, f は物体力である. 上式 (1) に, u_2 と 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

$$\int_{V} (\boldsymbol{f}^{1} \cdot \boldsymbol{u}^{2} - \boldsymbol{f}^{2} \cdot \boldsymbol{u}^{1}) dV = \int_{S} (\boldsymbol{t}_{k}^{2}(n_{k}) \cdot \boldsymbol{u}^{1} - \boldsymbol{t}_{k}^{1}(n_{k}) \cdot \boldsymbol{u}^{2}) dS$$
(2)

を得る. ここで物体力を無視すれば,式(2)は,

$$\tau_{kl}^{2} n_{k} u_{l}^{1} = \tau_{kl}^{1} n_{k} u_{l}^{2}$$
$$t_{l}^{2} u_{l}^{1} = t_{l}^{1} u_{l}^{2}$$
(3)

となり、相反定理が得られる.

3. 計測方法

ここでは、一点加振多点計測と多点加振一点計測 の応答波形を比較した.計測の概要を図-1(a)に示す. 今回,一定の加振力で振動を励起するために,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)を用いて図-1(b)のような加振器を製作し た.加振器で衝撃加振を行い,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 振力と加速度は、サンプリングレート 10 kHz で A/D 変換器を介してノート PC に送られる. PC 上では, まず,ノイズを除去するため,加速度に低域カットオ 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.次に,得られた加 速度に2階積分を行い,変位に変換した.最後に,全 計測点での応答変位の最大値ですべての波形を除算 することで、変位を正規化した. 試験体は図-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 $C_L = 6300$ m/s, 横波音速 $C_T = 3100$, 密 度 m/s, $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$) 平板を用いた. 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 計測概要



4. 相反定理を利用した振動の可視化

図-3に計測点15でのx, y, z方向の応答変位と応答 スペクトルを示す.計測実験を行った結果,y方向の 応答変位が良好に一致したが,x, 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(3)の相 反定理を成分表示すると、以下のようになる.

$$t_x^2 u_x^1 + t_y^2 u_y^1 + t_z^2 u_z^1 = t_x^1 u_x^2 + t_y^1 u_y^2 + t_z^1 u_z^2 \quad (4)$$

いま,加振力 $t_y \gg t_x, t_z$ なので, $t_x/t_y \approx 0, t_z/t_y \approx 0$ である.また,加振力は一定のため $t_y^1 = t_y^2$ なので,

$$u_y^1 = u_y^2 \tag{5}$$

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.次に,変位 |**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.

減肉部でのみ卓越したフーリエ振幅を有する周波 数に着目する.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 ことが確認できる.ここで,3340~3350 Hz でバンド パスフィルタを作用させたところ,減肉部が局所的に 振動する可視化結果を得ることができた.図–5(b)に 減肉部が局所振動する可視化結果を示す.

5. おわりに

アルミニウム平板に対して一点加振多点計測と多 点加振一点計測を行った結果,鉛直方向の応答変位は 等しいことがわかった.水平方向の変形は,垂直方向 に比べて小さいので,振動を可視化したときの双方の 結果は,類似したものとなった.また,得られた振動 データのパワースペクトルから,減肉部分が局所振動









図-5 (a) パワースペクトルおよび (b) 局所振動の可視化

する周波数帯域をターゲットとして,可視化を行った. この結果から,局所振動が観察でき,この可視化結果 から減肉部を検出できることを示した.

参考文献

- 川原正人ら: 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.
- 2) L.W. Schmerr : Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation, Plenum Press, New York, 1998.
- 3) 松岡弘大ら: 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.