

京都大学工学部地球工学科 学生員 ○増田 景也
 京都大学大学院地球環境学堂 正会員 古川 愛子
 京都大学大学院地球環境学堂 正会員 清野 純史

1. 研究の背景と目的

都市部の道路橋などでは多くの鋼床版が採用されているが、金属疲労が原因と思われる亀裂の発生が確認されている¹⁾。本研究では、図 1 のように平板のある 1 点を加振し、格子状に配置した複数の計測点の応答に対して 2 次元及び 3 次元高速フーリエ変換 (FFT) を施すことで、直達波と損傷からの反射波の到来時間と伝播速度を推定し、損傷を検出する手法を提案する。また、数値計算により手法の妥当性の検討を行う。

2. Lamb 波の分散性

Lamb 波とは、平板を伝播する弾性波の一種である。伝播方向に対して対称に変位する S モードと反対称に変位する A モードが存在し、さらに、それぞれに複数のモードが存在する。モード毎・振動数毎に位相・群速度が異なるという分散性を有する (図 2)。

3. 平板構造物の損傷検出手法

3.1 損傷検出手法の概要

図 1 のような平板上のある 1 点に、ある振動数 f_0 成分が卓越する瞬間的な衝撃波を与え、その応答を格子状の計測領域で計測する。応答には、加振点から伝わる波 (直達波) と損傷箇所から反射して伝わる波 (反射波) が存在する。直達波と反射波は到来時間が異なることを利用して損傷の有無を推定し、到来時間差と到来方向から損傷位置を検出する。

3.2 2 次元 FFT による直達・反射波の到来時間の推定

損傷が計測領域外にある場合を想定する。計測領域内の座標 (x, y) における時間 t の加速度応答 $w(x, y, t)$ を式(1)によって座標に関して 2 次元 FFT し、時間ステップ毎に計測領域内の波線の向きの変化を調べる。直達波と反射波では到来時間が異なることから両者を分離し、それぞれの到達時間帯及び到来時間差 Δt を推定する。

$$\hat{W}(k_x, k_y, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} w(x, y, t) \exp\{-2\pi i(k_x x + k_y y)\} dx dy \quad (1)$$

3.3 3 次元 FFT による損傷位置の推定

(1) 反射波の到来方向の推定

3.2 で推定した反射波の到来時間帯 ($t_1 \leq t \leq t_2$) の応答だけを取り出し、式(2)によって 3 次元 FFT する。振動数を加振振動数 f_0 に固定したときに、 $W(k_x, k_y, 2\pi f_0)$ が卓越している波数 (k_{x0}, k_{y0}) の値を調べることで、反射波の到来方向を表す方向ベクトル (k_{x0}, k_{y0}) が推定できる。

$$W(k_x, k_y, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{t_1}^{t_2} w(x, y, t) \exp\{-2\pi i(k_x x + k_y y + \omega t)\} dx dy dt \quad (2)$$

(2) 直達・反射波の伝播速度の推定

反射波の 3 次元 FFT: $W(k_x, k_y, 2\pi f)$ に対して、 k_x 成分を k_{x0} に固定したときの f - k_y 関係、 k_y 成分を k_{y0} に固定したときの f - k_x 関係を調べる。これらを波数について合成した f - k 関係と、図 2 の位相分散曲線から求まる振動数一波数関係 (f - k 関係、図 3) との比較から、伝わる波のモードを特定できる。Lamb 波のモードを特定できれば、群速度の分散曲線から反射波の伝播速度 C_R も推定できる。直達波についても同様の方法で伝播速度 C_D を推定できる。

(3) 損傷の位置の推定

加振点 A、計測領域 B の中心、損傷 D の位置をそれぞれ $A(a_x, a_y)$, $B(b_x, b_y)$, $D(d_x, d_y)$ とすると、損傷の位置に関する式は、

$$\frac{\sqrt{(d_x - a_x)^2 + (d_y - a_y)^2}}{C_D} + \frac{\sqrt{(d_x - b_x)^2 + (d_y - b_y)^2}}{C_R} = \frac{\sqrt{(b_x - a_x)^2 + (b_y - a_y)^2}}{C_D} + \Delta t \quad (3)$$

となる。ここで、 C_D は直達波、 C_R は反射波の伝播速度、 Δt は直達波と反射波の到来時間差である。 a_x, a_y, b_x, b_y は既知であるので、式(3)を d_x, d_y について解くと、 $D(d_x, d_y)$ の範囲が閉じた曲線内に絞られる。図 4 に示すように、この曲線と、3 次元 FFT によって得られた、損傷が位置する方向を示すベクトル (k_{x0}, k_{y0}) との交点上に損傷が存在すると推定できる。

4. 数値解析による検証

4.1 解析条件 (図5)

3次元有限要素法を用いた数値解析によって、提案手法を検証する。解析モデルは、幅500mm、奥行き400mm、厚さ6mmの平板であり、 $1.25 \times 1.25 \times 1.5\text{mm}$ のソリッド要素でモデル化し、底面の4隅を拘束した。材料はアルミニウムとし、ヤング率は $7.03 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ 、単位体積重量は 27 kN/m^3 、計算時間間隔は $1.0 \times 10^{-7} \text{ s}$ とした。減衰は、加振振動数における減衰定数を1%とする剛性比例型減衰とした。

加振点は $A(x=200\text{mm}, y=210\text{mm})$ とし、中心振動数150kHzのRicker Waveletを鉛直方向に与えた。計測領域は $B(x=290\text{--}328.75\text{mm}, y=190\text{--}228.75\text{mm})$ とし、1.25mm間隔で 8×8 点の計64点にて鉛直方向の加速度応答(m/s^2)を求めた。損傷は $D(x=308.75\text{--}310\text{mm}, y=300\text{--}301.25\text{mm}, z=0\text{--}6\text{mm})$ に空洞が存在するとした。

4.2 解析結果 (図6)

図6(a)に、加速度応答の2次元FFTの一例として、反射波到来時($7.99 \times 10^{-5} \text{ s}$)のものを示す。振幅が卓越する時間を調べることで、直達波と反射波の到来時間を推定した。図6(b)-(d)は反射波到来時間帯の加速度応答に対して3次元FFTした結果 $W(k_x, k_y, 2\pi f)$ である。図6(b)は振動数を150kHzに固定したときの k_x - k_y 毎の加速度振幅である。 $k_y=0, k_x=-200\pi$ において最大値を示すことから、真下方向に波が伝わることを、即ち損傷は真上方向であることを推定した。図6(c),(d)は k_y を -200π に固定したときの f - k_x 毎、 k_x を0に固定したときの f - k_y 毎の加速度振幅である。図3との比較によりS0モードであることを推定した。さらに伝播速度を推定した。同様のことを直達波に対しても行い、直達波はA0モードであることと伝播速度を推定した。最後に、式(3)と、損傷位置が真上方向であることから損傷の位置を推定することに成功した。

5. 結論

計測点を格子状に配置し、応答を2次元及び3次元フーリエ変換によって分析することで、直達波および反射波の到来時間、到来方向、Lamb波のモードの推定を可能とし、損傷を検出する手法を提案した。

参考文献 1)阪神高速道路株式会社：阪神高速の取り組み、鋼床版における損傷とその対策、<http://www.hanshin-exp.co.jp/company/torikumi/anzen/sonsyoun.html> (2015年2月21日閲覧)

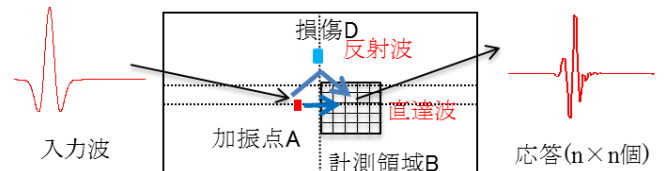


図1 平板構造物の損傷検出法の概要図

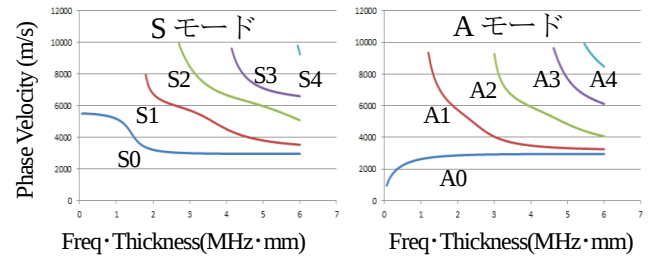


図2 位相速度の分散曲線

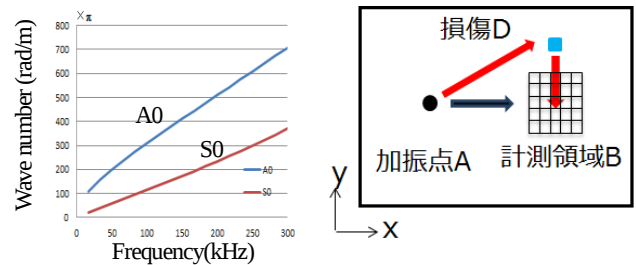


図3 板厚6mmのときの振動数-波数関係 (f-k関係)

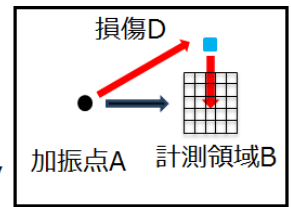


図5 計測領域の真上に損傷が存在する平板構造物

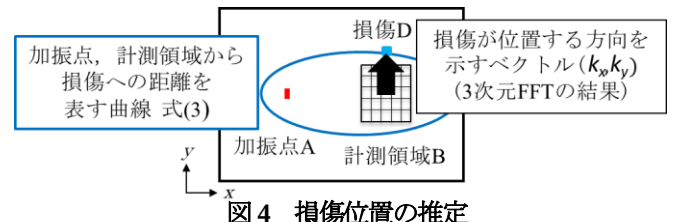


図4 損傷位置の推定

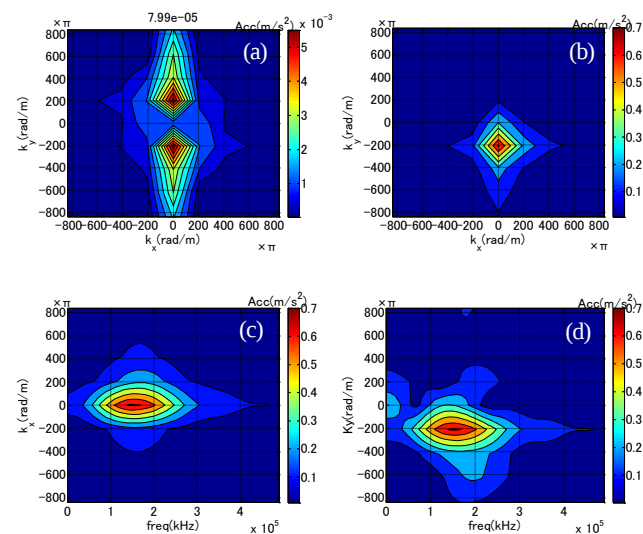


図6 解析結果 ((a)反射波到来時の加速度振幅の2次元FFT, 反射波到来時の加速度振幅の3次元FFTを(b) k_x - k_y 毎, (c) f - k_x 毎, (d) f - k_y 毎に示したもの)