

空間及び波数領域情報を利用した平板構造物の損傷検出手法

京都大学工学研究科 学生員 ○児島 啓太

京都大学地球環境学堂 正会員 古川 愛子

京都大学地球環境学堂 正会員 清野 純史

1. はじめに

都市部の道路橋では、軽量で施工工期が短いなどの利点を生かし、数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おり¹⁾、定期的な点検により状態を把握していく必要がある。近年、波動伝播を利用した様々な損傷検出手法に関する研究がなされている。鋼板などの平板状の構造物を伝わる波は Lamb 波と呼ばれ²⁾、Lamb 波は減衰が小さく長距離伝播し易いため一度に広いエリアの点検が期待できる。しかし、Lamb 波は多くのモードを有し、かつ各モードそれぞれに分散性があることから、計測波形の解釈が困難であるという問題がある。本研究では、1 次モードだけが発生する低い周波数帯を利用することによって、多モードの発生を抑制するが、このような周波数帯では損傷の大きさに比べて波長が十分に短くないため、加振点から直接伝わる波と損傷部で反射して伝わる波とが混在してしまう。この問題を解決するため、本研究では、格子状に配置した複数の計測点で応答を計測し、空間領域における情報のみならず、3 次元フーリエ変換によって求まる波数領域における情報も利用することによって、反射波を抽出できるようにする。反射波の到来方向および到来時間を推定し、損傷位置を検出する手法を提案する。

2. 損傷検出手法の概要

2.1 解析条件

提案手法の概要を、平板を対象とした数値解析の結果を紹介しながら説明する。対象構造物は幅 500mm × 奥行き 400mm × 厚さ 6mm の平板とした。材質はアルミニウム製で、密度は 2.7kg/m^3 、縦波速度は 6400m/s 、横波速度は 3170m/s とした。構造物の A 点 (200mm, 200mm) にて中心周波数 150kHz の Ricker Wavelet を鉛直方向に与え、鉛直方向の加速度応答を計測領域 B ($x=290\text{mm}\sim 307.5\text{mm}$, $y=190\text{mm}\sim 207.5\text{mm}$) において 2.5mm 間隔の計 64 点で計測した (図-1)。幅

2.5mm×深さ 6mm の閉口亀裂が存在すると仮定し、ジョイント要素でモデル化した。亀裂方向は y 方向とした。応答には 5% の正規乱数を与えた。

2.2 計測領域内の損傷検出 (空間領域)

まず、各計測点で得られた加速度応答のパワーを求める。パワーは次式で表される。

$$P(x, y) = \int_0^T \{a(x, y, t)\}^2 dt \quad (1)$$

ここに、 x, y は計測点の座標、 t は時間、 T は計測時間、 $a(x, y, t)$ は加速度応答、 $P(x, y)$ はパワーである。損傷箇所では波が反射されるため、計測領域内に損傷がある場合は損傷箇所に大きなパワーが得られることを利用し、パワーのコンター図から計測領域内の損傷の有無を判断することができる。

図-2 に、計測領域内の $x=300\text{mm}$, $y=200\text{mm}$ に損傷がある場合とない場合のパワーのコンター図を示す。図-2(b)より損傷位置に大きな値が出ていることがわかる。計測領域内に損傷がないと判断された場合は、次項の波数領域の手法に移る。

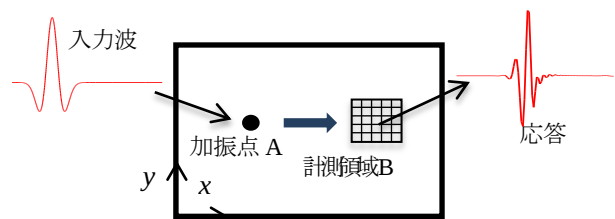
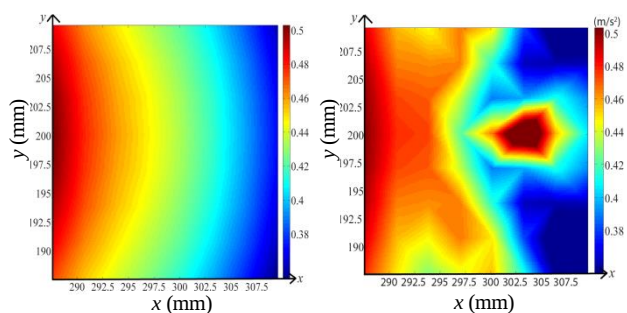


図-1 損傷検出手法の概要



(a) 損傷が存在しない場合 (b) 損傷が存在する場合

図-2 計測領域内の加速度パワーのコンター図

キーワード 損傷検出, 平板, 空間領域, 波数領域, フィルタリング

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C クラスター

2.3 計測領域外の損傷の方向の検出 (波数領域)

加速度応答の3次元フーリエ変換を行い、時間-空間領域から周波数-波数領域に変換する。応答には、加振点 A から直接伝わった直達波と、損傷箇所から反射されて伝わった反射波とが混在している。反射波を取り出すため、直達波を取り除くフィルターをかける。

$$W(k_x, k_y, \omega) = \varphi(k_x, k_y) \times \iiint a(x, y, t) \exp(-i(\omega t + k_x x + k_y y)) dx dy dt \quad (2)$$

ここに、 k_x, k_y は x, y 成分の波数である。 $\varphi(k_x, k_y)$ は、直達波を取り除くフィルターであり次式で表す。

$$\varphi(k_x, k_y) = \begin{cases} 0: & \text{if } k_x > 0, k_y = 0 \\ 1: & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

図-1 の配置では、直達波は x 方向に伝わり y 方向には伝わらないことから、波数 k_x が正で波数 k_y が 0 となる成分を取り除く。図-3 に、損傷がないときと損傷が $x=250\text{mm}, y=250\text{mm}$ にあるときのスペクトルを示す。直達波は同心円状に伝わるため、フィルタリングによって直達波を完全に取り除くことができない。しかし、損傷のない場合は図-3 が上下対称となっているのに対し、損傷がある場合は反射波があるため上下非対称となる。第 4 象限において値の大きいところの波数 k_x, k_y が反射波の波数であることから、反射波の到来方向がわかる(ここでは左上から伝わっていることがわかる)。

2.4 計測領域外の損傷の存在領域の検出 (波数領域)

次に、加速度応答を座標に関して2次元フーリエ変換し、2.3 で読み取った波数 k_x, k_y に対する時刻歴を求め。

$$\hat{W}(k_x, k_y, t) = \iint a(x, y, t) \exp(-i(k_x x + k_y y)) dx dy \quad (4)$$

図-4 にその時刻歴を示す。損傷がない場合は、加振点から同心円状に伝わった直達波のみが現れ、損傷がある場合は損傷からの反射波も現れるので、図-4(b) から直達波と反射波の到来時間の差 Δt を読み取る。加振点 A、計測領域 B の中心点、損傷 D の位置を $A(a_x, a_y)$ 、 $B(b_x, b_y)$ 、 $D(d_x, d_y)$ 、Lamb 波の群速度を c_g とすると、損傷位置に関する等式

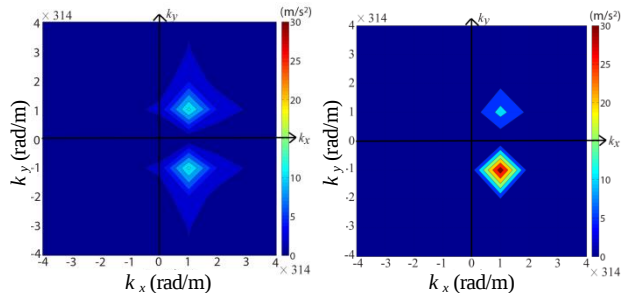
$$\begin{aligned} & \sqrt{(d_x - a_x)^2 + (d_y - a_y)^2} + \sqrt{(d_x - b_x)^2 + (d_y - b_y)^2} \\ &= \sqrt{(a_x - b_x)^2 + (a_y - b_y)^2} + c_g \Delta t \end{aligned} \quad (5)$$

が成立する。図-3(b)から読み取った波数と、図-4(b)か

ら読み取れる Δt から描ける式(5)の曲線から、図-5 のように損傷の位置を推定することができた。

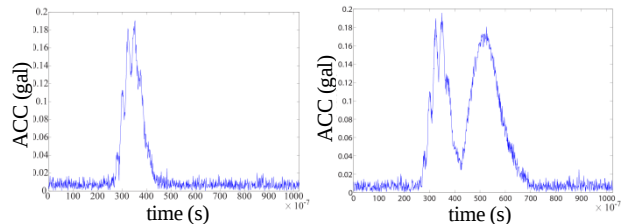
3. まとめ

本研究では、格子状の計測点で応答を計測し、空間領域と波数領域の情報を利用することで、損傷を検出する手法を提案した。計測領域内にある損傷は加速度パワーを用いた空間領域の手法で検出される。計測領域外にある損傷は、波数領域における加速度のコンター図に対して、直達波を除去するためのフィルタリングを施すことによって検出することができた。



(a) 損傷が存在しない場合 (b) 損傷が存在する場合

図-3 加速度の3次元フーリエ変換のコンター図
(フィルタリング後、周波数 150kHz に着目)



(a) 損傷が存在しない場合 (b) 損傷が存在する場合

図-4 加速度スペクトル $\hat{W}(k_x, k_y, t)$ の時刻歴図

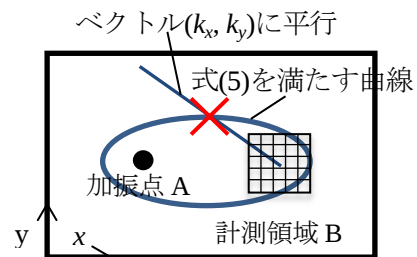


図-5 損傷位置の推定

参考文献

- 1) 阪神高速道路(株)：鋼床版疲労損傷への取り組み
<http://skill.hanshin-exp.co.jp/library/mainte/22104.html>
- 2) R.Gangadharan, C.R.L.Murthy, S.Gopalakrishnan, M.R.Bhat : Time reversal technique for health monitoring of metallic structure using Lamb waves, *Ultrasonics*, 49, 696-705, 2009.