

京都大学工学部 学生員 ○児島 啓太
 京都大学大学院工学研究科 正会員 古川 愛子
 京都大学大学院工学研究科 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軽量で施工工期が短いなどの利点を生かし、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、そのような亀裂は目視では確認できないリブの奥側に存在する場合もある。本研究では、時間反転を用いた損傷検出手法を提案する。時間反転を利用することにより、健全時における計測データを用いず、損傷時の計測データだけから損傷を検出する手法について提案し、数値計算により手法の妥当性の検討を行う。

2. 時間反転を利用した損傷検出手法の概要

時間反転を利用した損傷検出手法の概要は次の通りである。平板上のある点 (A 点とする) において、瞬間的な衝撃波 (Tone Burst) を与え (入力波とする)、その応答を別の点 (B 点とする) で計測する。B 点における応答波形を、音声を後ろから前へと逆再生するように時間反転したものを外力として B 点に再入力し、A 点において計測された応答波形を再度時間反転させたもの (再現波とする) を得る。そして、入力波と再現波の形状の一致度から損傷を検出できるというものである。

3. 損傷の有無と位置の特定

3.1 損傷のない構造物の再現波

構造物の全体質量 \mathbf{M} , 減衰 \mathbf{C} , 剛性マトリクス \mathbf{K} は各要素の要素質量, 減衰, 剛性マトリクスの総和として次式により表される。

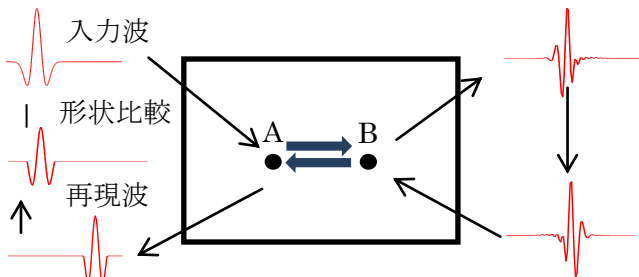


図 1 平板における損傷検出手法の概要図

$$\mathbf{M} = \sum_{e=1}^n \mathbf{M}^e \quad \mathbf{C} = \sum_{e=1}^n \mathbf{C}^e \quad \mathbf{K} = \sum_{e=1}^n \mathbf{K}^e \quad (1)$$

ここで、 n は要素の総数を、 $\mathbf{M}^e, \mathbf{C}^e, \mathbf{K}^e (e=1, 2, \dots, n)$ は全体質量, 減衰, 剛性マトリクスに対する e 番要素の要素質量, 減衰, 剛性マトリクスの寄与分である。

ここで、A 点での入力波を $S_{input}^A(\omega)$ とし、A 点における再現波を $S_{reconst}^A(\omega)$ と定義すると、A 点における再現波は

$$S_{reconst}^A(\omega) = H_{AB}^*(\omega) H_{BA}(\omega) S_{input}^A(\omega) = |H_{BA}(\omega)|^2 S_{input}^A(\omega) \quad (2)$$

となる。なお、 $\mathbf{H}(\omega)$ は伝達関数を表す。

3.2 損傷がある構造物の再現波

損傷は、切欠けなどの様な損傷を想定し、定式上は要素を取り除くことで表現し、その取り除く要素の集合を \mathbf{D}_e , 要素の属する自由度の集合を \mathbf{D}_n とする。

損傷がある場合の A 点における再現波は、

$$S_{reconst}^A(\omega) = S_{resp}^* H_{ab}^*(\omega) H_{ba}(\omega) S_{input}^A(\omega) + \sum_{e \in \mathbf{D}_e} \sum_{i \in \mathbf{D}_n} \sum_{j \in \mathbf{D}_n} H_{ab}^*(\omega) H_{bj}(\omega) S_{ji}^e(\omega) H_{ia}(\omega) S_{input}^A(\omega) + \sum_{e \in \mathbf{D}_e} \sum_{i \in \mathbf{D}_n} \sum_{j \in \mathbf{D}_n} H_{aj}^*(\omega) S_{ji}^{*e}(\omega) H_{ib}^*(\omega) H_{ba}(\omega) S_{input}^A(\omega) + [\sum_{e \in \mathbf{D}_e} \sum_{j \in \mathbf{D}_n} \sum_{i \in \mathbf{D}_n} H_{aj}^*(\omega) S_{ji}^{*e}(\omega) H_{ib}^*(\omega)] \times [\sum_{e \in \mathbf{D}_e} \sum_{i \in \mathbf{D}_n} \sum_{j \in \mathbf{D}_n} H_{bj}(\omega) S_{ji}^e(\omega) H_{ia}(\omega) S_{input}^A(\omega)] \quad (3)$$

となる。ここで、

$$\mathbf{S}^e(\omega) = -\omega^2 \mathbf{M}^e + i\omega \mathbf{C}^e + \mathbf{K}^e \quad (4)$$

とする。式(3)の第一項は式(2)と同じであり、式(3)の第一項から第四項は各々、図 2 の 4 つの伝達経路に相当する。

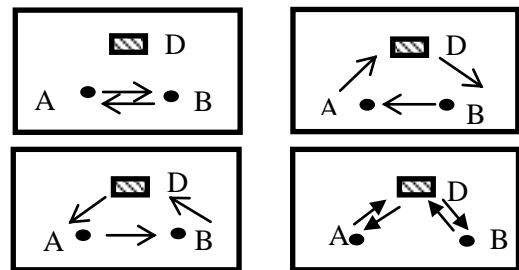


図 2 再現波を構成する四つの成分の伝達経路

式(2)及び式(3)の第一項と第四項は Schwarz の不等式より，入力波と位相のずれはなくスケールは異なるが形状は類似したものになり，第二項は，入力波と比べて位相が $\Delta t = (r_{bd} + r_{da} - r_{ba})/v_g$ だけ遅くなり，第三項も Δt だけ進むことになる．ここに r_{ij} は i 点と j 点間の距離， v_g は群速度である．以上のことより，再現波では，入力波において振幅が局在する時刻において，第一項と第四項に相当する成分があり，それより早い時刻に第二項，遅い時刻に第三項に相当する成分がある．この位相のずれた成分が複数あれば，その数だけ損傷があると考える．

次に，損傷位置 D の特定について述べる．再現波から Δt を読み取ると， $\Delta t = (r_{bd} + r_{da} - r_{ba})/v_g$ が成り立つので，これを D の座標について解くと上式を満たす D の範囲がある楕円上に絞られる．次に，A,B の位置を変えて同様に D の範囲を求め，これを繰り返すことで，すべての A,B に対して上式を満たす D から損傷の位置を特定することができる．

4. 数値解析による検証

4.1 解析モデル

解析モデルは図 3 に示すリブがない平板とリブを有する平板の二通りとし，ソリッド要素(2.5×2.5×3mm)でモデル化した．平板の厚さは 6mm でリブの厚さは 5mm，高さは 3mm とした．また，どちらの構造物も底面の 4 隅を拘束した．材料はアルミニウムとし，ヤング率は 7.03×10^{10} N/m²，単位体積重量は 27 kN/m³，計算時間間隔は 1.0×10^{-6} s とした．また，構造物の減衰は，剛性比例型減衰と仮定し，加振振動数における減衰定数を 1% と仮定した．損傷はどちらのモデルにおいても図 3 に示す位置に 15mm×15mm×3mm の空洞が存在するとした．

4.2 加振・計測条件

構造物の A 点において中心周波数 100kHz の Ricker Wavelet を鉛直方向に与えた．その応答を B 点において計測した．B 点において，鉛直方向の加速度応答(m/s²)を求め，これを時間反転したものを B 点の鉛直方向に外力(N)として入力し，A 点において鉛直方向の加速度応答(m/s²)を得て，さらにこれを時間反転して再現波を得た．入力波と再現波の比較から損傷の有無を検証し，損傷位置を特定するために，加振点と応答点を変えて，再現波を得た．

4.3 解析結果

解析結果を図 4 に示す．どちらのモデルにおいても左右対称の波形が表れ，損傷の存在を確認することができた．次に，加振点 A，応答点 B の組み合わせを変化させ，各々から得られる再現波の Δt と板波の位相分散曲線から得られる群速度 v_g を用いて楕円を描いた(図 5,6)．各々の楕円は損傷が存在する付近で交差しており損傷の位置を推定することができた．

5. 結論

本研究では，時間反転を利用することにより，健全時における計測データを用いず，損傷時の計測データだけから損傷を検出し，損傷の位置を特定する手法についての検討を行った．数値解析の結果から，平板，リブを有する平板，どちらにおいても損傷の有無，損傷の位置特定することができた．

参考文献 1) R.Gangadharan, Time reversal technique for health monitoring of metallic structure using Lamb waves, *Ultrasonics*, 49(2009), 696-705.

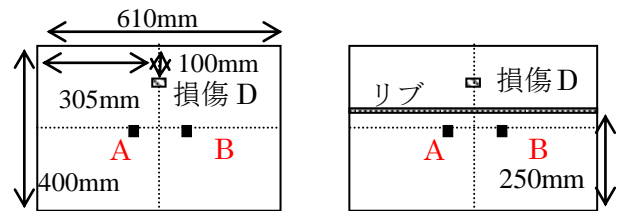


図 3 平板(左)とリブを有する平板(右)の概略図

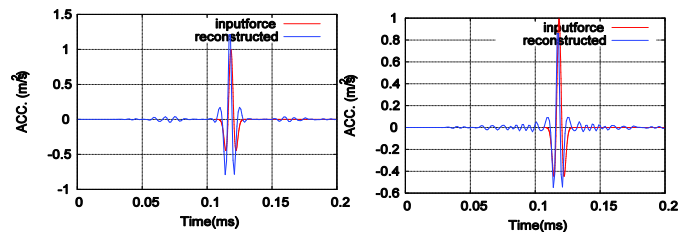


図 4 平板(左)とリブを有する平板(右)

における再現波と入力波の比較

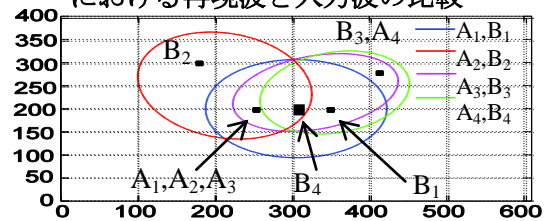


図 5 平板における損傷位置

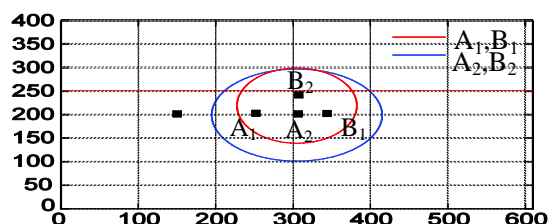


図 6 リブを有する平板における損傷位置