

超音波伝搬特性を考慮した開口合成法の改良と鋼板裏面の画像化

東京工業大学院 学生会員 ○Worawit Padungsriborworn

東京工業大学院 正会員 古川 陽

東京工業大学院 正会員 廣瀬 壮一

1. はじめに

近年, 道路橋の点検において目視困難な部位に経年劣化による損傷が報告されており¹⁾このような損傷が進行すると構造崩壊など重大な事故を招く危険性がある. これらの事故を回避するために, 維持管理に適切な非破壊検査技術が必要となる. その中で, 超音波探傷法の画像化を用いられる開口合成法²⁾は, 計測した波形の振幅を対応する空間に重ね合わせプロットすることで, 材料内の欠陥の像を構成する方法である. しかし, 工夫をせずには鮮明な画像が得られるとは限らない. そこで本研究は, 探触子と試験体の位置関係から決定された伝搬特性を Schmerr³⁾によって導出された近似波動解で求め, 開口合成法の改良に用いる. 特に, コンクリートに埋め込まれた鋼材腐食を早期探知できる非破壊検査技術開発のため, 図1に示すような基礎モデルを用いて, 鋼板裏面の損傷を画像化し, 提案手法の有効性を検討する.

2. 超音波伝搬特性を近似する計算法

Schmerr によって導出された近似波動解は, 探触子から発生した超音波が部材に入射した際に生じる部

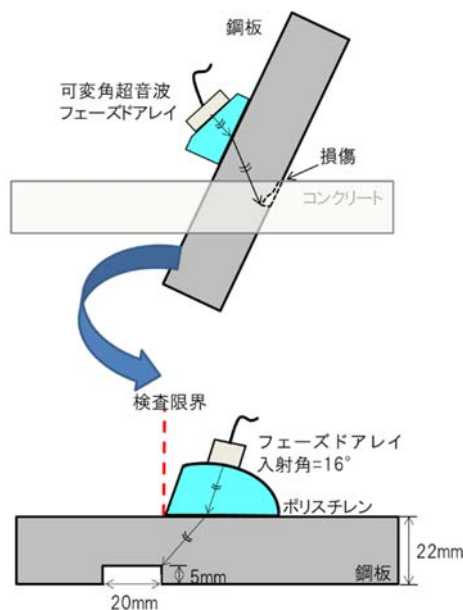


図1 目視困難部位の例とその基礎モデル

材内部の変位を表す. 図2に示すような状態を考える. このとき, 超音波探触子の面 S_T から発生した波は固体1 (ρ_1, c_{p1}, c_{s1})を伝搬し, スネルの法則で求められた屈折点 x_5 に到達する. その後, 固体2 (ρ_2, c_{p2}, c_{s2})中を伝搬し観測点 x_2 へ到達する. これらの位置関係に基づいた近似波動解は素子の面 S_T における積分を含んだ下記の式で表現できる.

$$u^p(x, \omega) = \frac{p_0}{2\pi\rho_1 c_{p1}^2} \int_{S_T} \frac{K_p(\theta_1) d_2^{P:P} T_{12}^{P:P} \exp(ik_{p1}D_1 + ik_{p2}D_2)}{\sqrt{\Delta_x^{P:P}} \sqrt{\Delta_y^{P:P}}} dS \quad (1)$$

ここに, p_0 は探触子の圧力, ρ_δ は媒質の密度, $c_{y\delta}$ は速度, $K_p(\theta_1)$ は指向性関数, d_δ^y は振動方向, $T_{12}^{y:P}$ は媒質1から媒質2へ透過する波の透過係数を示す. また, k_{py} は波数, ω は探触子の角振動数である. 添字 δ は媒質を(1:ポリスチレン 2:鋼), y は波のモードを(P:縦波 S:横波)表す. D_1 は素子の積分点から屈折点までの距離, D_2 は屈折点から観測点までの距離を表す. なお, $\Delta_x^{P:P}, \Delta_y^{P:P}$ は停留値法によって決定される.

3. 超音波伝搬特性を用いた開口合成法の改良

式(1)によって計算した送信素子 i から鋼板内部の点 x へ到達する波の振幅を $|u_i^p(x, \omega)|$, 点 x から受信素子 j へ到達する波の振幅は相反定理を用い, 超音波の進行方向を逆にしても同じ挙動を示す. このとき透過係数 $T_{21}^{y:P}$ を用いれば, 波の振幅は $|u_j^p(x, \omega)|$ で表現できる. これらを用いて, 補正係数

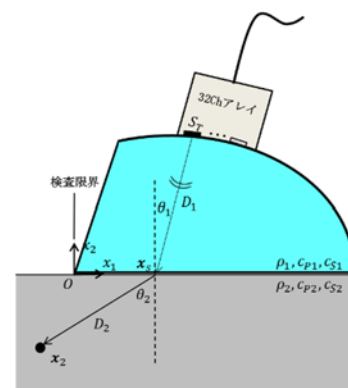


図2 斜角入射の探傷状態

キーワード 非破壊検査, 超音波, フェーズドアレイ探触子, 開口合成法, 鋼板腐食

連絡先 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1, W8-22

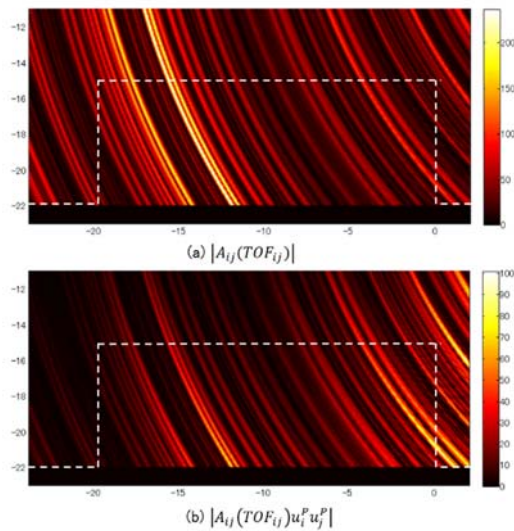


図3 補正が開口合成法に与える影響

を $|u_i^p(\mathbf{x}, \omega)| |u_j^p(\mathbf{x}, \omega)|$ とする. この補正係数は超音波の伝搬特性を表す. 補正係数を用いることで, 従来の開口合成法で考慮することが困難な伝搬方向の影響を計算に含むことが可能となる. 補正公式は次式で与えられる.

$$S^V(\mathbf{x}) = \sum_i \sum_j |A_{ij}(TOF_{ij})| |u_i^V(\mathbf{x}, \omega)| |u_j^V(\mathbf{x}, \omega)| \quad (2)$$

ここに, $|A_{ij}(TOF_{ij})|$ は TOF_{ij} (i : 送信素子, j : 受信素子) に対応する観測波形データの振幅の絶対値を表す. 従来の開口合成法における分布 $|A_{ij}(TOF_{ij})|$ は図 3(a) に示す, 同図(b) に, 提案手法による開口合成法における分布 $|A_{ij}(TOF_{ij})| |u_i^V(\mathbf{x}, \omega)| |u_j^V(\mathbf{x}, \omega)|$ を示す. 従来の開口合成法では, 波の到達時刻が等しくなる位置は, 振幅の値が等しくなる. これに対して, 本手法では, 波の伝搬方向に依存して, 振幅の値が変化している様子が確認できる. 補正係数で表す伝搬特性を重みとして重ね合わせることでより鮮明な画像が得られることが期待できる.

4. 実験結果

実験は中心周波数 5MHz の 32 チャンネルのリアフェーズドアレイを用いて行った. 可変角ポリスチレンウェッジを用いて, 入射角度を 16° で設定した. 本実験は P 波が欠陥の右上の角に当たるのに, 16° が適切だと計算したことで行った. 試験体の厚さは 22mm, 人工欠陥は長さ 20mm 深さ 5mm である. 実験結果は図 4(a), (b) に示す. 従来の開口合成法による結果(図 4(a))では, 欠陥の右上と右下の角を大まかに位置特定できたが全体的にノイズ

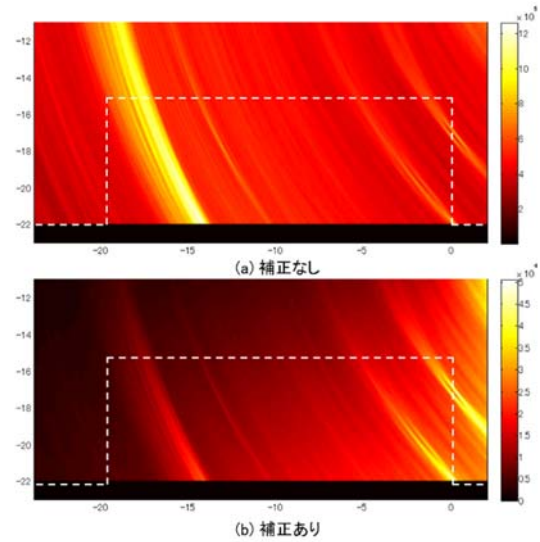


図4 鋼板裏面の画像化

が多くみられ, 欠陥の左側に疑似エコーが観測された. 図 4(b) は補正した開口合成法による画像を示す. この図では, 全体的にノイズが少なくなり, 欠陥の右上と右下の角をより鮮明に画像化できた. また, 伝搬特性が計算に含んだ効果として, 左側の疑似エコーも弱まった.

5. おわりに

超音波伝搬特性を考慮した開口合成法の改良を行い, 鋼板裏面における欠陥を画像化した. 近似波動解で計算した伝搬特性を用いて開口合成法を改良することにより, 伝搬方向による波の強さを考慮した画像化が可能となり, 波が強く伝搬する方向の画像化精度が改良された. 今後は, S 波の補正効果を検討し, P 波と S 波を組み合わせることで, より精度の高い検査手法の開発を目指す.

参考文献

- 1) 木村嘉富, 村越潤, 飯田明弘, 高橋実木: 道路橋における目視困難な重要構造部位を対象とした点検技術に関する研究, 土木研究所平成 21 年度重点プロジェクト研究報告書 戦略研究 No. 戦-39, 2009.
- 2) 木本和志, 松江剛士, 廣瀬壮一: 数値シミュレーションを用いた開口合成法の欠陥形状再構成能に関する研究, 応用力学論文集, vol. 7, pp. 91-96, 2004.
- 3) Lester W. Schmerr, Jr.: Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation: A Modeling Approach, Springer, 1998.