

I-25

超音波を利用した異種材料界面剥離形態の評価

○東北大学 学生員 須藤 貴史
 東北大学 学正員 中畑 和之
 東北大学 正員 北原 道弘

1. はじめに

欠陥により散乱された超音波を用いて、この散乱波が有する情報をもとに構造部材内部に存在する欠陥像の再構成を行いたい。ここでは、鉄筋とセメントペーストの界面剥離に着目し、Kirchhoff 近似に基づいた線形化逆散乱解析法に、実験による散乱波形データを適用して剥離部の再構成を試みる。逆散乱解析の手法および水浸法を用いた実験による計測波形の処理法と剥離部の再構成結果について述べる。

2. Kirchhoff 逆散乱法

均質等方な2次元無限弾性体 D 内に欠陥 D^c が存在しているものとする。欠陥の大凡の位置が推定できているものと仮定し、遠方の測定境界面 S^∞ 上に設置した探触子によって入射波 u^0 を送信し、欠陥 D^c からの散乱波 u^{sc} を同じ探触子で受信する。欠陥を取り囲むように多点で散乱波形を計測することにより、受信散乱波形から逆に欠陥の形状を推定する。ここでは縦波を送信して、欠陥から後方に散乱された縦波を受信するパルスエコー法を採用する。

Kirchhoff 近似を導入して線形化した縦波の散乱振幅は次式で表される¹⁾。

$$A_m(k_L, \hat{y}) = -\frac{u^0 \hat{y}_m k_L}{2} \int_D \gamma(\mathbf{x}) e^{-2ik_L \hat{y} \cdot \mathbf{x}} dV \quad (1)$$

ここで u^0 は入射波の振幅、 k_L は縦波波数、 $\hat{y}$ は探触子の方向を表す単位ベクトル、 $\gamma(\mathbf{x})$ は特異関数と呼ばれる入射波が直接到達する境界部分のみで値をもつ関数である。特異関数 $\gamma(\mathbf{x})$ は $K(=2k_L \hat{y})$ -空間のフーリエ変換像であることから、欠陥の位置と形状を表す特異関数 $\gamma(\mathbf{x})$ は散乱振幅 $\hat{y}_m A_m(k_L, \hat{y})$ の逆フーリエ変換として次のように求めることができる。

$$\gamma(\mathbf{x}) = \frac{-2}{\pi^2} \iint \frac{1}{u^0 k_L} \hat{y}_m A_m(k_L, \hat{y}) e^{2ik_L \cdot \mathbf{x}} k_L dk_L d\hat{y} \quad (2)$$

以下、式(2)を基に、縦波散乱振幅 $\hat{y}_m A_m(k_L, \hat{y})$ を用いて、界面剥離部の再構成を試みる。

3. 数値解析結果を用いた鉄筋及び円形空洞境界の再構成

本研究の目的である界面剥離部の評価の前段階として解析によりセメントペースト中の鉄筋と円形空洞境界の再構成をBEMによる数値解析から試みた結果を図-1に示す。超音波計測実験を考慮し、入射振幅のプロファイル Gauss 分布で近似した入射場で、 $1.5 < ak_T < 17.6$ の範囲にある無次元波数 ak_T を与える。ここで a は、欠陥の代表長であり空洞及び鉄筋の半径とし、セメントペーストの材料定数は、縦波の波速 $c_L = 4500\text{m/s}$ 、横波の波速 $c_T = 2562\text{m/s}$ 、密

度 $\rho = 2100\text{kg/m}^3$ 、鋼の材料定数は縦波の波速 $c_L = 5900\text{m/s}$ 、横波の波速 $c_T = 3200\text{m/s}$ 、密度 $\rho = 7900\text{kg/m}^3$ とした。

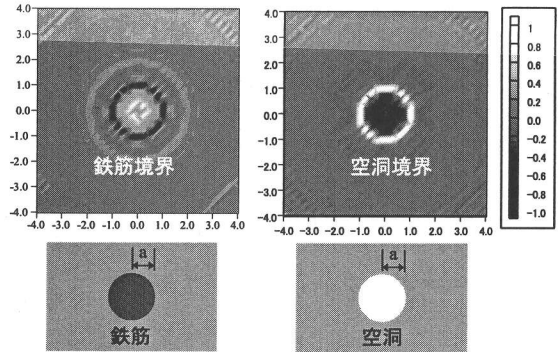


図-1 Kirchhoff 逆解析による鉄筋及び円形空洞境界の再構成結果

図-1の再構成結果からセメントペースト中の鉄筋と円形空洞の境界上に明暗(正負)の差が生じており、実際の計測においても鉄筋と剥離(空気層)を区別できる可能性がある。この正負の差の起きる理由として、物質の音響インピーダンス $Z = \rho c_L$ の差による後方散乱波形の反転、非反転の差²⁾が式(2)における縦波散乱振幅 $\hat{y}_m A_m(k_L, \hat{y})$ を介して、再構成結果に反映されていると解釈できる。

4. 超音波モデル実験

4.1 予備実験

実際の計測において剥離部(空気層)をセメントペーストと鉄筋の間に作成するのは困難であるため、空気層と同様の後方散乱波形が得られる物質をセメントペーストと鉄筋の間に挟み込むことにより仮想剥離部

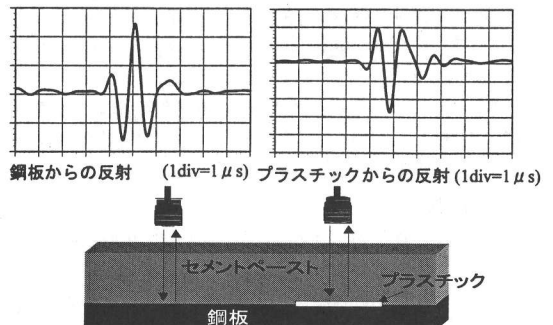


図-2 鋼とプラスチックからの反射波形

を作ることとする。挟み込む材料を選択するための予備実験として様々な物質を鋼板とセメントペーストの間に配置し図-2の下図のように反射波形を測定した。反射波形形状が鋼の波形と反転していてかつ空洞のものとはほぼ同じことからプラスチックを使用して剥離部分の作成を行う。図-2の上図に鋼とプラスチックによる反射波形を示す。

4.2 実験概要

本研究では図-3に示すような実験装置を用いて水浸パルスエコー法により実験を行った。探触子は水浸型 (SONIX 社製公称中心周波数 1MHz) を使用した。供試体は図-4に示すように円筒形のセメントペーストの中心に直径 13mm の鉄筋を通し、鉄筋の一部に剥離物質として空気の代わりにプラスチックを張りつけ仮想界面剥離とした。剥離モデル A は鉄筋の一部を掘り、その部分にプラスチックを埋め込んだもので、剥離モデル B は鉄筋外部にプラスチックを覆い被せたものである。

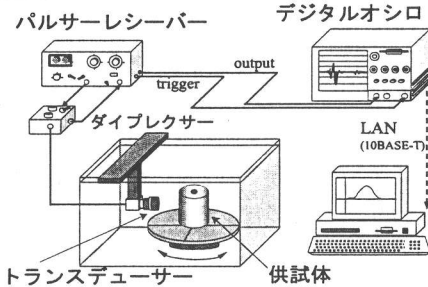


図-3 実験装置

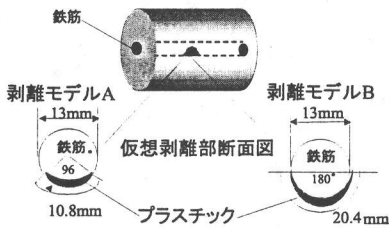


図-4 供試体

4.3 波形データ処理

計測系の線形性を仮定すると、図-5の左図に示した受信散乱波形 $O^{sc}(f)$ は周波数域において次のように表現できる。

$$O^{sc}(f) = I(f)T(f)W(f)H_{ws}(f)E^{sc}(f) \times H_{sw}(f)W(f)R(f) \quad (3)$$

ここで、 I は入力電圧、 T は (送信) 探触子、 W は水、 H_{ws} は水から固体、 E^{sc} は固体内の空洞からの散乱、 H_{sw} は固体から水、 R は (受信) 探触子の伝達特性を表している。いま、図-5の右図に示したように同じ材質、同じ外半径を有する円柱供試体を用いて、参照波

形 O^{ref} を計測する。この供試体は中心に平面境界となるように空洞を空けてある。この参照波形は周波数域で次のように書ける。

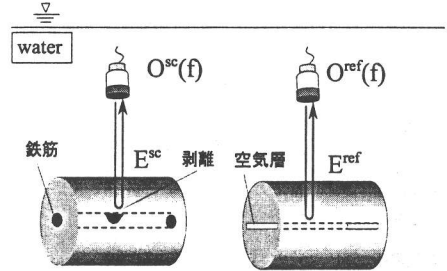


図-5 散乱波形 $O^{sc}(f)$ と参照波形 $O^{ref}(f)$

$$O^{ref}(f) = I(f)T(f)W(f)H_{ws}(f)E^{ref} \times H_{sw}(f)W(f)R(f) \quad (4)$$

式 (3) と式 (4) より $O^{sc}(f)$ の表現を得る。

$$E^{sc}(f) = E^{ref} \frac{O^{sc}(f)}{O^{ref}(f)} \quad (5)$$

上記の $E^{sc}(f)$ は弾性体中の空洞に縦波が入射されたときの散乱振幅に相当する。参照波の実験において探触子と供試体の距離を本実験と同じようにとれば、上記の $E^{sc}(f)$ は弾性体中の空洞に縦波が入射されたときの散乱振幅に相当し、式 (2) の $\hat{y}_m A_m(k_L, \hat{y})$ として利用できる。

5. 鉄筋剥離部の再構成結果

計測波形から欠陥像を再構成した結果を図-6に示す。両モデルとも剥離部分の境界上の特異関数 $\gamma(x)$ は、正 (白) の値を持ち鉄筋部分は負 (黒) の値をもっている。この結果は、3.における数値解析結果と一致する。このことから Kirchhoff 逆散乱法は母材の音響インピーダンスより低い境界と高い境界部分を判別でき、剥離部分を識別できることがわかる。

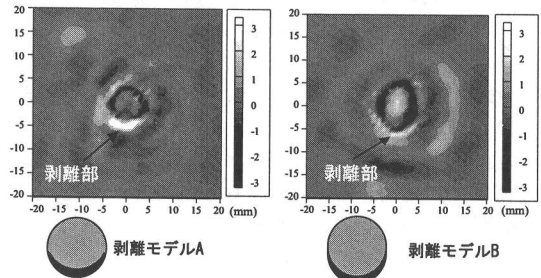


図-6 Kirchhoff 逆散乱法による再構成結果

参考文献

- 1) 中畑和之, 北原道弘: 計測波形による欠陥形状の再生と使用周波数帯域に関する考察, 応用力学論文集, Vol.3(2000), pp91-98.
- 2) 小田島淳, 中畑和之, 北原道弘: 位相の反転・非反転現象に着目した欠陥による後方散乱波形解析, 境界要素法論文集, Vol.18(2001), pp23-28.