

超音波を利用した界面損傷部の識別

東北大学大学院 正員 山田 真幸 東北大学大学院 学正員 須藤 貴史
 東北大学大学院 学正員 中畑 和之 東北大学大学院 正員 北原 道弘

1. はじめに

土木構造部材中に存在する局所的な損傷や欠陥の評価への適用を目的として、異種材料界面の損傷の定量的かつ非破壊的な評価を試みる。ここでは異種材料界面に発生する損傷に着目し、鉄筋とセメントペーストとの界面の一部で生じた損傷を想定した局所的界面損傷モデルを持つ円柱状の供試体を作成した。そしてパルスエコー法により散乱波形を取得し、Kirchhoff 逆解析に基づいた線形化逆散乱解析法を適用して損傷部と健全部の再構成を行う。

2. Kirchhoff 逆散乱法

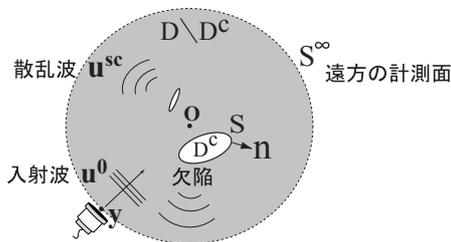


図-1 超音波の送受信

図-1 に示すように均質等方な 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という仮定のもと、遠方の計測面 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。ここではパルスエコー法の測定を考え、遠方の探触子から縦波を送信して、欠陥から散乱された縦波を同じ探触子で受信することとする。この設定のもとで等価散乱源を用いた散乱波の境界型積分表現に Kirchhoff 近似を導入し、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、 $\gamma(\mathbf{x})$ は入射波が直接到達する境界部分のみで値をもつ特異関数であり、その分布から欠陥の位置と形状を表すことができる。この特異関数 $\gamma(\mathbf{x})$ は、式 (1) の散乱振幅 $\hat{y}_m A_m(k_L, \hat{y})$ が $\mathbf{K}(= 2k_L \hat{y})$ -空間のフーリエ変換像であることに注意すれば、散乱振幅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。

$$\gamma(\mathbf{x}) = \frac{-2}{\pi^2} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \frac{1}{u^0 k_L} \hat{y}_m A_m(k_L, \hat{y}) e^{2ik_L \hat{y} \cdot \mathbf{x}} k_L dk_L d\hat{y} \quad (2)$$

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、界面損傷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

ここでは数値解析により界面の再構成を行った例を示す。前述の方法にて固体中の鉄筋と円形空洞境界の再構成を BEM により数値的に試みた結果を図-2 に示す。

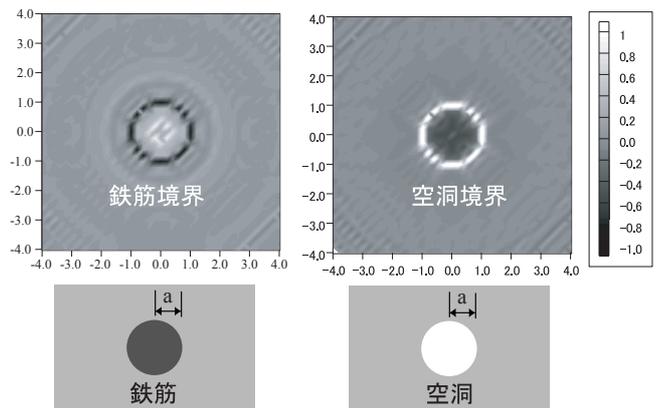


図-2 Kirchhoff 逆解析による鉄筋及び円形空洞境界の再構成結果

実際の実験を考慮し入射波の振幅のプロファイルを 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化波数 ak_T を与えた。ここで a は、欠陥の代表長として選んだ空洞及び鉄筋の半径であり、固体はセメントペーストとして縦波波速は $c_L = 4500\text{m/s}$ 、横波波速は $c_T = 2562\text{m/s}$ 、密度 $\rho = 2100\text{kg/m}^3$ を用いた。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-2は $\gamma(\mathbf{x})$ をプロットしたものであり、固体中の鉄筋と円形空洞の境界上に明暗 (正負) の差が生じていることがわかる。境界における物質の音響インピーダンス $Z = \rho c_L$ の差により後方散乱波形の位相が反転、あるいは非反転²⁾ となるが、この現象が式 (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考えられる。このことを利用することにより実際の計測において鉄筋と損傷部を区別できる可能性があるといえる。

4. 超音波モデル実験

(1) 予備実験

実際の計測に用いる供試体の作成はセメントペーストを用いる。内部に鉄筋を配置するにあたり局所的に損傷部を設けることとする。しかし供試体作成上の困難から損傷部

と同様の後方散乱波形が得られる物質を鉄筋に貼ることにより損傷モデルを作ることとする．損傷モデルの材料は図-3の上図のような予備実験で反射波形を測定して選択し，プラスチックを用いることに決定した．図-3の下図から，反射波形形状が鋼からの波形と反転していることがわかる．

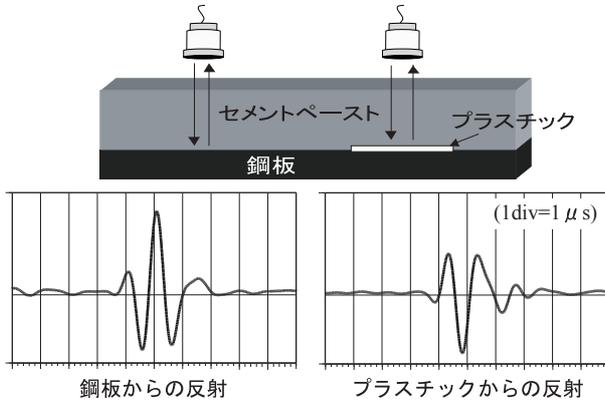


図-3 鋼とプラスチックからの反射波形

(2) 実験による後方散乱波形の取得

水浸パルスエコー法により実験を行った．探触子は公称中心周波数 1MHz のものを使用した．供試体は図-4に示すように直径 100mm の円筒形のもので，中心に直径 13mm の鉄筋を配し，一部に前述の損傷モデルを取りつけた．損傷モデル A は鉄筋の一部を切削してプラスチックを埋め込んだ．損傷モデル B は鉄筋外周にプラスチックを被せた．

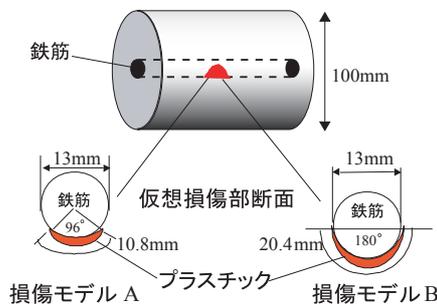


図-4 供試体

(3) 波形処理

計測波形より本方法に必要な縦波散乱振幅を取り出すために以下の波形処理を行う．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．

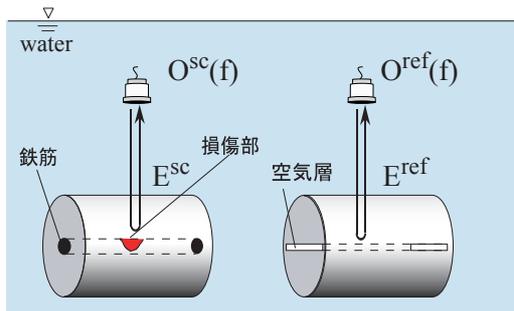


図-5 散乱波形 $O^{sc}(f)$ と参照波形 $O^{ref}(f)$

$$O^{sc}(f)$$

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

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す．いま図-5の右図に示すような同じ材質，同じ半径で中心に平面境界となるような空洞を有する円柱供試体を用いて同じ測定条件で参照波形 O^{ref} を計測する．この参照波形は周波数域で次のように書ける．

$$O^{ref}(f)$$

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

式 (3) と式 (4) より以下の $E^{sc}(f)$ の表現を得て，内部欠陥の影響のみを取り出すことができる．

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

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であり，式 (2) の $\hat{y}_m A_m(k_L, \hat{y})$ として利用できる．

5. 鉄筋界面損傷部の再構成結果

以上の手順で計測波形から損傷部を再構成した結果の例を図-6に示す．損傷モデルの位置は図中の境界の下半分であり，両モデルとも境界上の特異関数 $\gamma(x)$ は正 (白) の値を持っていることがわかる．対して境界の上半分である健全部は負 (黒) の値をもっている．この結果は，3.における数値解析の結果と一致する．これらのことから Kirchhoff 逆散乱法を用いた本方法により音響インピーダンスの違いを利用して境界の健全部と損傷部をセメントペーストを用いた供試体で識別できたといえる．

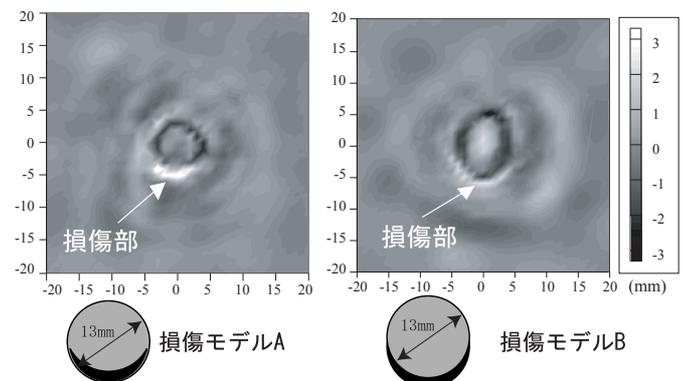


図-6 Kirchhoff 逆散乱法による再構成結果

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.