

超音波を用いた部材内部鉄筋の形状イメージングと損傷評価

愛媛大学 正会員 ○中畑和之
愛媛大学 学生員 藤澤伸匡
東京工業大学 正会員 廣瀬壮一

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物において鉄筋の位置・配置パターンを非破壊的に推定できれば、部材の補修・補強時において効率的な作業が可能となる。そこで、本研究では部材内部に対して超音波を送受信することによって鉄筋形状のイメージングを行うことを目的とする。ここでは鉄筋のイメージング手法として弾性逆散乱解析法¹⁾を採用する。これは散乱振幅²⁾から散乱体の形状を再構成する逆解析手法であり、逆散乱解析の高速実行・高精度形状推定等、実用化を意図した研究が行われている³⁾。本手法は散乱体の形状をイメージングするものであるから、鉄筋とコンクリートとの付着面に生じる損傷箇所からの散乱波が計測できれば、鉄筋形状だけでなく損傷部のイメージングも可能であると考えられる。ここでは、数値解析による鉄筋形状および損傷部のイメージング例を示す。

2. 線形化逆散乱解析法

ここでは超音波を部材内部に送信し、鉄筋からの散乱波データを弾性逆散乱解析に入力することによって内部鉄筋形状の再構成を行う。具体的には散乱波形から縦波散乱振幅を抽出し、これをインプットデータとして用いる。ここで、散乱振幅 A は、鉄筋の形状情報を含む等価散乱源 q からの積分表現として以下のように表される¹⁾。

$$A_n(k_L, \hat{y}) = \frac{1}{4\rho c_L^2} \hat{y}_i \hat{y}_n \int_D q_i(\mathbf{x}) e^{-ik_L \hat{y} \cdot \mathbf{x}} dV \quad (1)$$

上式の ρ と c_L はそれぞれ母材の密度と縦波音速、 k_L は縦波の波数、 $\hat{y}$ はビーム交軸点から計測点を向く単位ベクトルを表している。等価散乱源 q は鉄筋形状を表す特性関数と鉄筋上の未知変位を含んでいるため、式(1)は非線形方程式であることが問題となる。ここでは、ボルン近似とキルヒホフ近似に基づく2種類の線形化手法を導入する。

ボルン逆解析は、等価散乱源 q に含まれる散乱体上の変位 u を入射波 u^{in} で置き換えることによって散乱振幅の表現式(1)を線形化して解く手法である。線形化された散乱振幅は次のように書くことができる。

$$A_n(k_L, \hat{y}) = i \frac{u^0 \hat{y}_n k_L^2}{2} \int_D \Gamma(\mathbf{x}) e^{-2ik_L \hat{y} \cdot \mathbf{x}} dV \quad (2)$$

ここで、 u^0 は入射波の振幅であり、 $\Gamma(\mathbf{x})$ は欠陥内部で値をもつ特性関数である。この特性関数 $\Gamma(\mathbf{x})$ は次のような

逆フーリエ変換によって再構成することができる。

$$\Gamma(\mathbf{x}) = -i \frac{2}{\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{1}{u^0 k_L^2} \hat{y}_n A_n(k_L, \hat{y}) \times e^{2ik_L \hat{y} \cdot \mathbf{x}} k_L dk_L d\hat{y} \quad (3)$$

キルヒホフ逆解析は、等価散乱源 q に含まれる散乱体境界の変位場 u を入射波と反射波の和で近似し、式(1)を線形化して解く手法である。このとき線形化された散乱振幅は次のようになる。

$$A_n(k_L, \hat{y}) \propto -\frac{u^0 \hat{y}_n k_L}{2} \int_D \gamma_H(\mathbf{x}) e^{-2ik_L \hat{y} \cdot \mathbf{x}} dV \quad (4)$$

ここで、 $\gamma_H(\mathbf{x})$ は入射波が直接到達する散乱体の境界部分で値をもつ特異関数である。ボルン逆解析と同様に、この特異関数 $\gamma_H(\mathbf{x})$ も逆フーリエ変換によって再構成できる。

$$\gamma_H(\mathbf{x}) = -\frac{2}{\pi^2} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{1}{u^0 k_L} \hat{y}_n A_n(k_L, \hat{y}) \times e^{2ik_L \hat{y} \cdot \mathbf{x}} k_L dk_L d\hat{y} \quad (5)$$

次節では、数値解析で得られた散乱振幅を基に式(3)と(5)を実行することによって鉄筋形状のイメージングを試みる。

3. 形状再構成シミュレーション

3.1. 鉄筋のイメージング

本手法をコンクリートのような非均質材に適用する前に、基礎的検討として均質なセメント ($c_L = 3900\text{m/s}$, $\rho = 2100\text{kg/m}^3$) の内部に直径 10mm の円形鉄筋 ($c_L = 5800\text{m/s}$, $\rho = 7800\text{kg/m}^3$) が存在する場合についてイメージングを試みる。ここでは、超音波の送信周波数は 0.1 ~ 1.2MHz に設定し、鉄筋を取り囲む全方位から送受信を行った。図-1 下部の左側がボルン逆解析、右側がキルヒホフ逆解析による再構成結果である。ボルン逆解析では鉄筋の内部が再構成されており、キルヒホフ逆解析では鉄筋の境界が再構成されているのがわかる。

次に、直径 10mm の4つの円形鉄筋が近接して存在する場合について鉄筋形状のイメージングを行った結果を図-2 に示す。このとき、最も近い鉄筋同士で 20mm、最も遠い鉄筋同士で 28mm の中心間距離を有する。ボルン逆解析の結果から、鉄筋が近接する部分で再生像が若干歪んでいるが、4つの鉄筋の形状が良好に再構成されているのがわかる。一方、キルヒホフ逆解析では、超音波が直接到達する部分における鉄筋境界の形状は再構成できているが、鉄

キーワード：超音波、逆散乱解析法、鉄筋、イメージング

〒790-8577 松山市文京町3, TEL: 089-927-9812, FAX: 089-927-9840, E-mail: nakahata@dpc.ehime-u.ac.jp

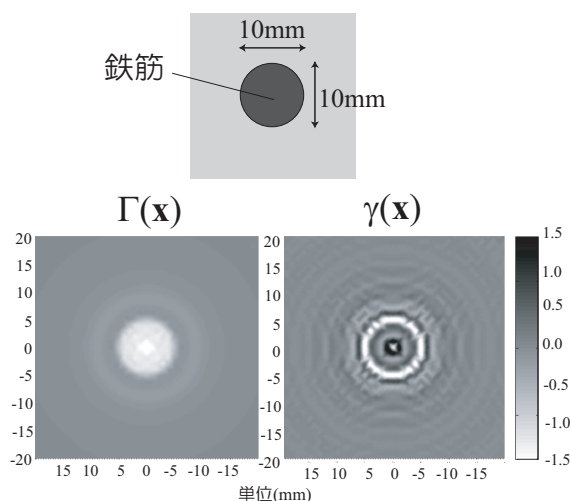


図-1 円形鉄筋の形状再構成

筋が近接する部分では不鮮明である。キルヒホフ逆解析で鉄筋が近接する部分の再構成精度が劣る原因として、鉄筋同士の多重散乱の影響が考えられる。キルヒホフ逆解析は高周波近似に基づくものであるために多重散乱の影響が再構成に虚像として現れやすいが、低周波近似に基づくボルン逆解析はこれらの影響をうけにくいアルゴリズムであるため、4つの鉄筋形状が良好に再構成できるのではないかと考えられる。

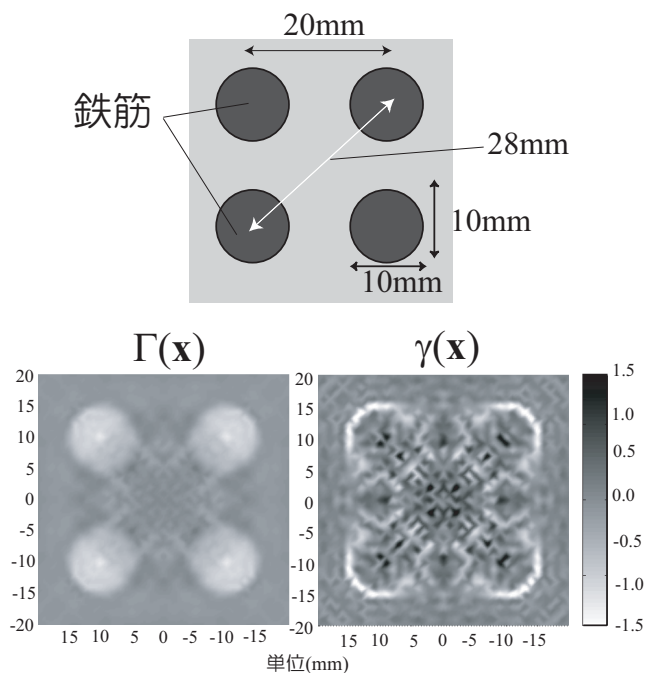


図-2 円形鉄筋が複数存在する場合の形状再構成

3.2. き裂が発生した鉄筋のイメージング

鉄筋とコンクリートの付着面において、応力集中や経年劣化等によってき裂が生じている場合がある。そこで、本解析では付着面からセメント内部に向かってき裂が発生している状況を想定し、き裂を含めた鉄筋形状の再構成を試みた。直径20mmの円形鉄筋から長さ4mmのき裂が伸展しているモデルに対して超音波を送信し、イメージングを行った結果を図-3に示す。ボルン逆解析は散乱体の領域を再構成するため鉄筋形状は再現できるが、き裂のような体

積のない形状の再生は困難である。一方、キルヒホフ逆解析は散乱体の境界を再構成するため、鉄筋の境界とき裂部の形状が再構成されている。キルヒホフ逆解析の再構成図において、鉄筋の境界部とき裂部では再構成された γ の値の正負が異なっているのがわかる。この正負の違いは、内部鉄筋とき裂部では超音波が散乱する場合の反射率の符号が異なるために、散乱振幅の位相が反転することに起因する。いま、半無限界面をもつ2つの媒質を考えると、材質 $m=1$ を伝播する超音波が材質 $m=2$ の界面で反射するときの反射率 R は次式で表される²⁾。

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (Z_m = \rho_m c_m) \quad (6)$$

ここで Z は音響インピーダンスであり、密度 ρ_m と縦波音速 c_m の積で表される。シミュレーションで用いた材料定数を式(6)に代入すれば、セメント-鉄筋の反射率 R_{steel} は0.69、セメント-空洞の反射率 R_{void} は-1.0となり、反射率の正負は異なっているのがわかる。

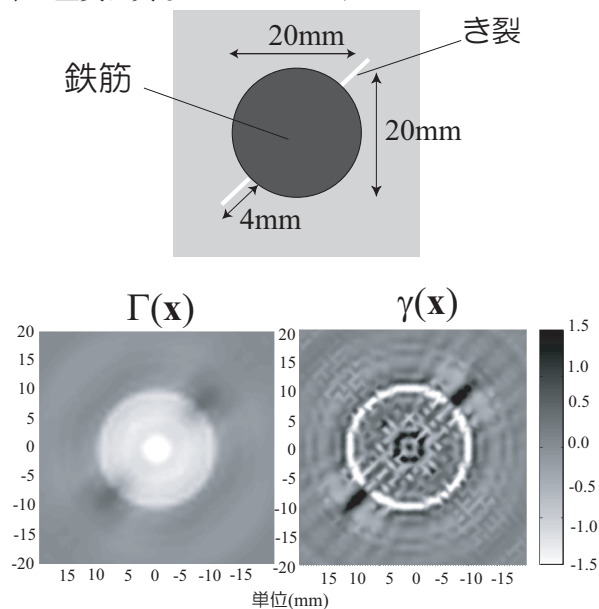


図-3 き裂を有する円形鉄筋の形状再構成

4. 結論

本研究では、線形化逆散乱解析法を用いて部材内部の鉄筋形状のイメージングを行った。シミュレーション結果から、ボルン逆解析は鉄筋領域の、キルヒホフ逆解析は鉄筋境界の再構成が可能であることがわかった。ここでは、鉄筋とセメント部の付着面からき裂が存在する場合についても逆散乱法の適用を試みた。その結果、ボルン・キルヒホフ両解析を組み合わせることで、き裂の識別を含めた鉄筋形状のイメージングが可能であることを示した。

参考文献

- 1) Kitahara, M., Nakahata, K. and Hirose, S.: Elastodynamic inversion for shape reconstruction and type classification of flaws, *Wave Motion*, Vol.36, pp.443-455, 2002.
- 2) Schmerr, L.W.: *Fundamental of Ultrasonic Nondestructive Evaluation*, Plenum Press, New York, 1998.
- 3) 中畑和之, 北原道弘: 多点受信波形を用いた逆散乱解析の高精度化, 土木学会論文集, No.745/I-65, pp.143-153, 2003.