

パルスエコー法による三次元欠陥識別の試み

東北大学大学院 正員 山田真幸
 東北大学大学院 学生員 早川洋行
 東北大学大学院 正員 北原道弘

1. はじめに

超音波を利用して、構造部材内部に存在する欠陥の内部領域と境界を再構成する二つの逆散乱解析法¹⁾を組み合わせることによってクラックのような面状欠陥とポイドのような体積型欠陥とを分離・識別する試みは、二次元欠陥で行なわれている。ここでは土木構造部材中に存在する欠陥の評価への適用を目的として、三次元欠陥に対する識別の可能性について数値解析と計測実験の両面から検討する。

2. 三次元逆散乱法

以下では超音波の送受信を同一の点で行なうパルスエコー法を用いるものとする。図-1に示すような三次元無限弾性体 D 内に欠陥 D^c が存在している場合を考える。平面波 u^0 を送信し、欠陥 D^c からの散乱波 u^{sc} を遠方の計測点 y で得ることとする。

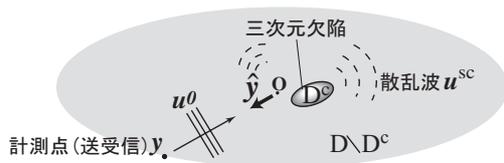


図-1 三次元散乱波動場

2.1 ボルン逆解析

ボルン近似を導入して線形化した遠方の計測点 y における縦波散乱振幅は次式の様になる。

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

ここで $\Gamma(\mathbf{x})$ は欠陥の領域内でのみ値を有する特性関数である。また k_L は縦波の波数、 \hat{y} は原点より計測点の方向を向く単位ベクトルである。式(1)の右辺の積分は $\mathbf{K} = 2k_L \hat{y}$ とすれば、特性関数 Γ の \mathbf{K} 空間におけるフーリエ変換である。これを逆フーリエ変換することにより $\Gamma(\mathbf{x})$ は次式の様に表示される。

$$\Gamma(\mathbf{x}) = \frac{1}{(2\pi)^3} \oint \int_0^\infty \frac{\hat{y}_m A_m(k_L \hat{y})}{2u^0 k_L^2} e^{2ik_L \hat{y} \cdot \mathbf{x}} 8k_L^2 dk_L d\Omega(\hat{y}) \quad (2)$$

ここに $d\Omega(\hat{y})$ は微小立体角である。

2.2 キルヒホフ逆解析

キルヒホフ近似を導入して線形化した遠方の計測点 y における縦波散乱振幅は次式の様になる。

$$A_m(k_L \hat{y}) = 2iu^0 \hat{y}_m k_L \int_D \gamma(\mathbf{x}) e^{-2ik_L \hat{y} \cdot \mathbf{x}} dV \quad (3)$$

ここで $\gamma(\mathbf{x})$ は入射波が直接到達する境界部分のみで値を有する特異関数である。式(3)の逆フーリエ変換より $\gamma(\mathbf{x})$ は次式の様に表示される。

$$\gamma(\mathbf{x}) = \frac{1}{(2\pi)^3} \oint \int_0^\infty \frac{\hat{y}_m A_m(k_L \hat{y})}{2iu^0 k_L} e^{2ik_L \hat{y} \cdot \mathbf{x}} 8k_L^2 dk_L d\Omega(\hat{y}) \quad (4)$$

式(2)と(4)から $\hat{y}_m A_m(k_L \hat{y})$ が与えられれば $\Gamma(\mathbf{x})$ と $\gamma(\mathbf{x})$ が求まり、 $\Gamma(\mathbf{x})$ と $\gamma(\mathbf{x})$ を空間上にプロットすることにより欠陥形状を再構成することができる。

3. 数値解析による形状再構成

ここでは数値解析により得られる散乱振幅を用いて欠陥形状の再構成を試みる。図-2に示す様に三次元無限弾性体内の座標原点に欠陥モデルの中心を配置し、境界要素法を用いて縦波散乱振幅 $A_m(k_L \hat{y})$ を求め、式(2)と(4)を適用し $\Gamma(\mathbf{x})$ と $\gamma(\mathbf{x})$ を空間上にプロットした。縦波散乱振幅は $\theta = 0 \sim 180^\circ$ 、 $\phi = 0 \sim 360^\circ$ において 10° 毎に無次元化縦波波数 ak_L を $0.01 \sim 7.0$ の範囲で求めた。

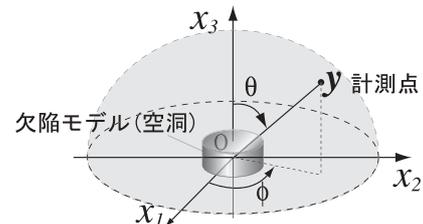


図-2 数値解析モデル

3.1 円柱型欠陥の形状再構成

ここでは半径が a で、厚さがそれぞれ a , $0.05a$ の円柱形状ポイド、及び半径 a 、厚さ 0 の円形クラックに対して再構成を行い、欠陥の厚さと逆解析結果の関係を調べる。式(2)、(4)を用いた再構成結果の断面図を図-3に示す。図-3に見られる様に、欠陥モデルの厚さが小さくなるにつれてボルン逆解析による再構成像は薄くなり、厚さ 0 のクラックでは解析上のノイズレベルとなる。一方キルヒホフ逆解析では欠陥の厚さにかかわらず境界が再構成されていることがわかる。この結果から、ボルン逆解析とキルヒホフ逆解析を組み合わせることにより、クラックのような面状欠陥とポイドのような体積を有する欠陥を識別することが可能になると考えられる。

3.2 複合型欠陥の再構成と識別

次に欠陥モデルを図-4に示すような面状欠陥(円形クラック)と球形ポイドの複合欠陥として逆解析による形状再構成を試みた。結果を図-5に示す。

キーワード：欠陥識別，形状再構成，パルスエコー法，超音波，ボルン近似，キルヒホフ近似

〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06, TEL 022-217-7126, FAX 022-217-7127, URL: <http://www.nde.civil.tohoku.ac.jp/>

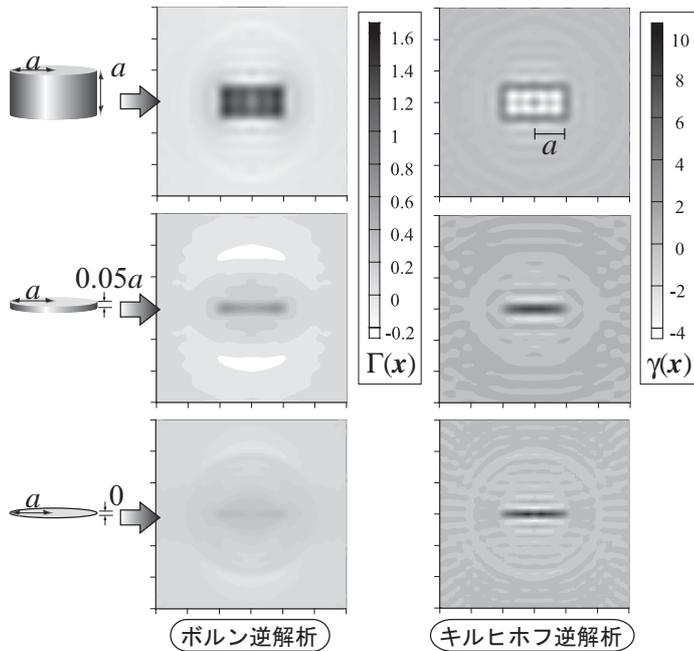


図-3 円柱の厚さと再構成結果の対応 (x_1 - x_3 断面)

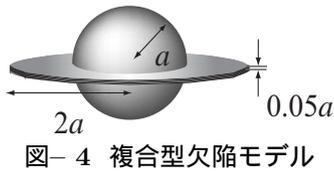


図-4 複合型欠陥モデル

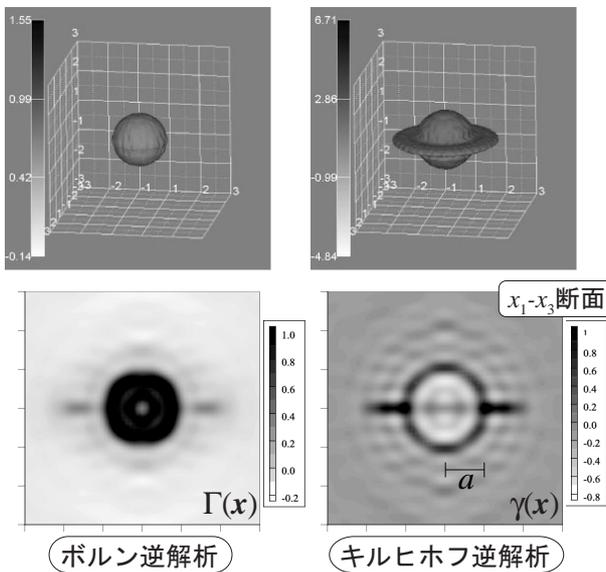


図-5 複合型欠陥の逆解析結果

図-5の x_1 - x_3 断面図に示される様に、面状欠陥とポイド状欠陥の複合モデルにおいてもボルン逆解析では球形のポイド部分が再構成され、キルヒホフ逆解析ではクラック部分の境界とポイド部分の境界が再構成されていることが分かる。

4. 計測波形による形状再構成

実験計測により得られる欠陥モデルからの散乱波形より欠陥形状の再構成を試みるため、図-6に示す欠陥モデルを有するアルミニウム製供試体を作成した。供試体中には半径 5mm の円柱空洞の先端に、半径 5mm の半球空洞と半

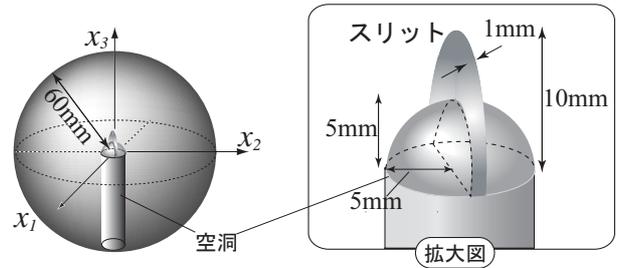


図-6 アルミニウム供試体

径 10mm で幅約 1mm の円形空洞スリットを加工した。超音波の送受信は直径 25.4mm, 中心周波数 1MHz の探触子を用いて水浸法にて行った。PC 制御の計測装置を用いて $\theta = 0 \sim 90^\circ$ を 5° 毎, $\phi = 0 \sim 360^\circ$ を 5° 毎に散乱波形を計測した。

計測から得られた散乱波形の時間域データを周波数域にフーリエ変換し波形処理を行った後、式 (2) と (4) を用いて上半球部 ($0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ, 0^\circ \leq \phi \leq 360^\circ$, 図-2参照) について逆解析を行なった結果を図-7に示す。

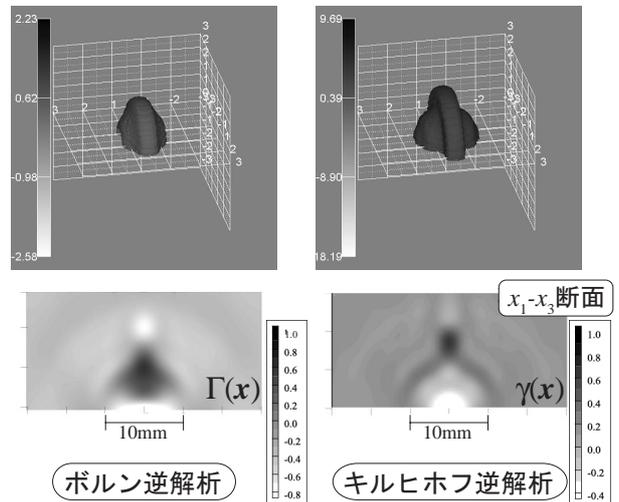


図-7 逆解析結果

図-7の x_1 - x_3 断面図を見ると、キルヒホフ逆解析では半球面とスリット部が再構成されている。一方ボルン逆解析では欠陥の半球部分に加えてスリットの一部が再構成されているが、ボルン逆解析とキルヒホフ逆解析両者の反応状況を比較することにより、面状に近い欠陥か体積型の欠陥かを判断するための情報は得られるといえる。ボルン逆解析においてスリットの一部が再構成された理由として、供試体のスリット部の厚さが 1mm と有限であることが考えられる。

5. 結論

数値解析による三次元逆散乱解析結果からは、クラック状欠陥とポイド状欠陥の識別が可能であることが確認できた。計測波形を用いた三次元逆散乱解析結果からは欠陥の識別が可能であることをある程度示すことができた。

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関する考察, 応用力学論文集, Vol.3, pp.91-98, 2000.