

線形化逆散乱解析法による非均質材料内の欠陥形状再構成

Shape reconstruction of flaws in an inhomogeneous material by linearized inverse scattering methods

山田真幸*・大西正浩**・北原道弘***

Masaki YAMADA, Masahiro ONISHI and Michihiro KITAHARA

*正会員 博(工) 東北大学大学院助手 工学研究科土木工学専攻 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 06)

**正会員 修(工) 三重県 津地方建設局津建設部 (〒514-0003 三重県津市桜橋 3-446-34)

***工博 元東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻

For the maintenance of civil structures, it is important to characterize the flaw geometry. The linearized inverse scattering method is improved with the aim of applying it to the civil structures. The method utilizes the scattering amplitude in an elastic solid for reconstructing the shape of flaws, and the low frequency component of measured wave data plays a key role. The ultrasonic wave in low frequency range has potential to propagate deeply in the structural component and reflect back from flaws. In this study, data processing techniques to extract the scattering amplitude from the measured waves are discussed and a convenient method to obtain a reference waveform is proposed. And, concrete specimens that contain flaw models are prepared and experimental measurements are carried out to confirm the performance of the method.

Key Words : inversion, ultrasonic, non-destructive evaluation, concrete materials, maintenance

1. はじめに

我々の社会生活を支える土木構造物の中には長年の使用により生じた損傷や欠陥を含むものがある。これらを検出し適切な対応をすることは安全で快適な社会の維持に必要不可欠であり、土木技術者の責務の一つである。高度経済成長期に建造された構造物の劣化が指摘されている昨今、健全度や耐久性を判断する検査技術の開発が求められているが、これらの損傷や欠陥について適切な対応を計画するにあたり、損傷や欠陥の程度を正確に同定することは不可欠である。ここでは土木構造物中の欠陥の幾何形状を非破壊的に得る方法を扱うことで、構造物の健全度、耐久性診断技術に資することを考えたい。

固体内部に超音波を送信し、内部欠陥からの散乱波形データを用いて欠陥形状を再構成する手法の一つに線形化逆散乱解析法があり、水浸法¹⁾による超音波実験により得られた波形からアルミニウム製円柱供試体中の欠陥モデルの形状を再構成できることが示されている²⁾。本手法を実構造物へ応用することを考えると現状では手法上の制約が多く、これらの制約を取り去る必要がある。本手法の応用に関する研究では直接接合法による欠陥形状の再構成³⁾、欠陥種の識別⁴⁾、再構成像の高精度化⁵⁾、逆散乱解析の高速化³⁾などが行われている。また、本手法は低周波数の超音波を利用

することが可能であることから^{2,6)}、大規模かつ非均質なコンクリート構造物の内部に存在する欠陥の形状再構成への適用が期待できる。

しかしながら上に述べた既往の研究において、線形化逆散乱解析法の定式化にあたっては、欠陥を均質材料中に存在するものとして扱っており、非均質物の影響については手法上考慮していない。非均質物の影響を考慮した研究に、細骨材の分布率から位相速度の周波数変化を考慮したものがある⁷⁾。しかしながら計測実験にはモルタル製供試体を用いており、コンクリート製供試体中の欠陥の再構成能について検討したものではない。

そこで本論文では、コンクリート構造物を対象として線形化逆散乱解析法による欠陥形状の再構成を試みる。

計測実験による散乱波形を用いた欠陥形状再構成では、線形化逆散乱解析法に必要な散乱振幅に相当する成分を参照波形を用いたデータ処理を行うことで散乱波形より抽出しているが、ここでは非均質物の影響を考慮したデータ処理方法を考える。

また、本手法の実構造物への適用を考えた場合に制約の一つとなる参照波形計測に関して、これを簡易に行うことが可能な一手法を提案する。

2. 二次元線形化逆散乱解析法

土木構造物内に存在する欠陥を、図-1に示すような等方均質な二次元無限弾性体 D と、そこに存在する空洞

† Dedicated to the memory of Prof. Michihiro KITAHARA

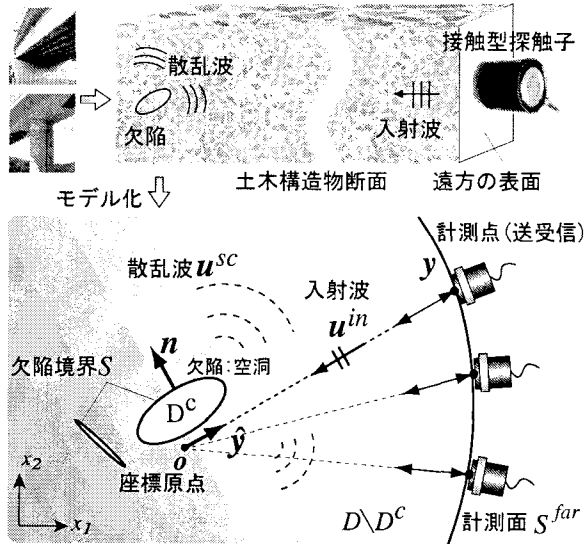


図-1 モデル化された欠陥の存在する二次元弾性波動場
 D^c としてモデル化する. 遠方近似: $|\mathbf{y} - \mathbf{x}| = |\mathbf{y}| - \hat{\mathbf{y}} \cdot \mathbf{x}$ が成り立つ遠方の $\mathbf{y}$ で観測される散乱波 $\mathbf{u}^{sc:far}$ に含まれる成分である散乱振幅から欠陥形状を推定する手法の一つが線形化逆散乱解析法であり, その定式化については文献²⁾⁻⁴⁾に詳しい.

ここでは実験的な検証において一つの探触子で超音波を送信, 受信するパルスエコー法 (一探触子法) を用いることとする. このとき入射波は遠方に存在する境界 S^{far} 上の点 $\mathbf{y}$ より座標原点 $\mathbf{o}$ に向けて送信され, 欠陥 D^c による散乱波 $\mathbf{u}^{sc:far}$ は同じ点 $\mathbf{y}$ で受信されることとなる.

散乱振幅 $A^\alpha(k_\alpha, \hat{\mathbf{y}})$ は波数域における遠方での散乱波 $\mathbf{u}^{sc:far}(\mathbf{y})$ の成分として以下のように定義される.

$$\mathbf{u}_m^{sc:far}(\mathbf{y}) = \sum_{\alpha=L,T} A_m^\alpha(k_\alpha, \hat{\mathbf{y}}) D(k_\alpha |\mathbf{y}|) \quad (1)$$

ここで k_α は波数 ($\alpha=L$: 縦波, T : 横波) である. また $D(z) = \sqrt{2/(\pi z)} e^{i(z-\pi/4)}$ は $\mathbf{y}$ 点で観測される円筒波であることから, 散乱振幅は遠方における円筒波の振幅情報と位相情報を有するものである. また, $A^\alpha(k_\alpha, \hat{\mathbf{y}})$ は波数 k_α と座標原点から観測点の方向 $\hat{\mathbf{y}}$ の関数であるが, 座標原点からの距離である $|\mathbf{y}|$ は含まれておらず, 散乱振幅が計測点と送信中心の距離 $|\mathbf{y}|$ に関係しない物理量であることがわかる.

ここでは縦波散乱振幅 $A^L(k_L, \hat{\mathbf{y}})$ から欠陥の形状の再構成を行う.

(1) ボルン逆解析

ボルン近似^{8,9)}を適用した縦波散乱振幅 $A^L(k_L, \hat{\mathbf{y}})$ ($= \hat{\mathbf{y}}_m A_m(k_L, \hat{\mathbf{y}})$) の積分表現に逆フーリエ変換を施せば, 欠陥領域において値を持つ特性関数 $\Gamma(\mathbf{x})$ は次式のように表される.

$$\Gamma(\mathbf{x}) = -\frac{2}{\pi^2 u^0} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{i}{k_\alpha} A^L(k_L, \hat{\mathbf{y}}) e^{2ik_L \hat{\mathbf{y}} \cdot \mathbf{x}} dk_L d\hat{\mathbf{y}} \quad (2)$$

ここで, u^0 は入射波の振幅である.

(2) キルヒホフ逆解析

キルヒホフ近似^{10,11)}を適用した縦波散乱振幅の積分表現に逆フーリエ変換を施せば, 欠陥境界上で値を持つ特異関数 $\gamma(\mathbf{x})$ は次式のように表される.

$$\gamma(\mathbf{x}) = -\frac{2}{\pi^2 u^0} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty A^L(k_L, \hat{\mathbf{y}}) e^{2ik_L \hat{\mathbf{y}} \cdot \mathbf{x}} dk_L d\hat{\mathbf{y}} \quad (3)$$

(3) 特性関数 Γ および特異関数 γ による欠陥形状再構成

式(2)と式(3)は散乱振幅と形状を表す関数 Γ あるいは γ との関係を示すものである. 欠陥を取り囲む全ての計測点 $\mathbf{y}$ で散乱振幅 $A^L(k_L, \hat{\mathbf{y}})$ を得て, 式(2)および式(3)に代入することで $\Gamma(\mathbf{x})$ および $\gamma(\mathbf{x})$ が得られる.

$\Gamma(\mathbf{x})$ は欠陥の領域内で, $\gamma(\mathbf{x})$ は欠陥の境界で値を持つことから, $\Gamma(\mathbf{x})$ および $\gamma(\mathbf{x})$ を $\mathbf{x}$ 空間にプロットすることにより欠陥モデルの形状を再構成することができる. 特性関数 $\Gamma(\mathbf{x})$ および特異関数 $\gamma(\mathbf{x})$ を用いた欠陥形状再構成のイメージを図-2に示す.

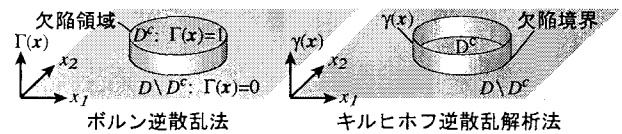


図-2 特性関数 Γ と特異関数 γ のイメージ

3. 二次元線形化逆散乱解析法のコンクリート製供試体への適用

ここではコンクリート製供試体を用いて, 実験的に欠陥 D^c による散乱波 $\mathbf{u}^{sc:far}$ を得て, これを用いた線形化逆散乱解析法の欠陥形状再構成能を検討する.

3.1 コンクリート製供試体を用いた散乱波形計測

式(2), 式(3)によると散乱振幅は座標原点 $\mathbf{o}$ を取り囲む位置から観測される必要がある. また先に述べたように散乱振幅には座標原点からの距離 $|\mathbf{y}|$ の関数ではないが, 実験計測で得られる散乱波形には座標原点からの距離が不可避に影響する. そのために供試体は軸対称で, かつ座標原点から計測面までが等距離である円柱の外形を持つものとした. ここでは検査者が扱える重量を考慮し, 直径が300mm, 高さが約350mmの円柱とした. また, 欠陥モデルは外形が円柱の中心軸に対称な形状とすることとし, 供試体を作製した. 欠陥モデルは円形空洞, クラック状の欠陥を模したノッチ状空洞および剥離鉄筋モデルの3種類とした. 円形空洞およびノッチ状空洞モデルはパイプ状のものおよび板状のものを型枠に設置してコンクリートを打設し, 完全に硬化する前に引き抜くことで作成した. 剥離鉄

筋モデルは鉄筋を模した鋼棒にビニルテープを貼ることで付着が剥離した部分を模擬的に作製した。

用いたコンクリート製供試体および欠陥モデルの諸元を図-3、図-4に示す。

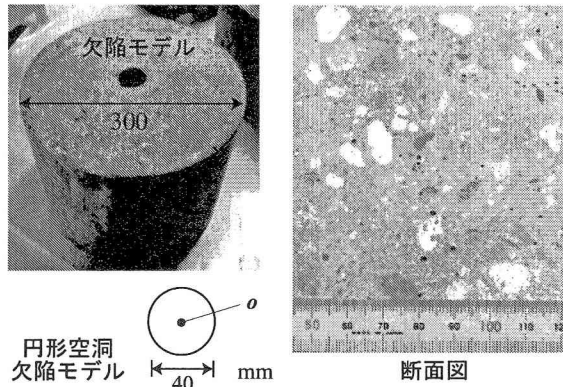


図-3 コンクリート製円柱供試体(円形空洞欠陥モデル, 粗骨材の体積率 20%)の外観および断面

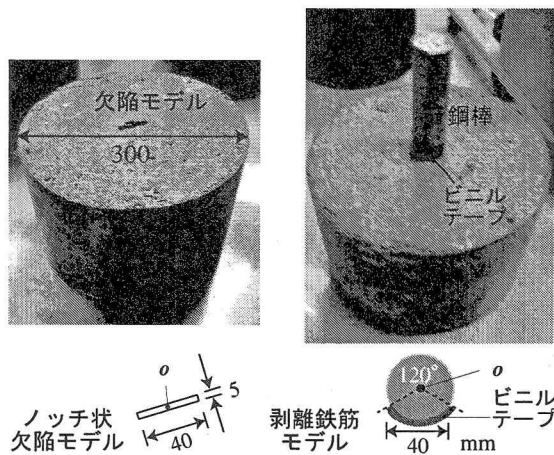


図-4 コンクリート製円柱供試体(ノッチ状欠陥モデル, および剥離鉄筋モデル)

(1) 配合の検討

供試体を構成する材料は配合を調整したコンクリートとした。

一般にコンクリート構造物の超音波計測では、骨材等の存在による減衰により欠陥からの散乱波形の計測が困難とされているが、事前の検討で供試体の材料をモルタルとした場合には後述する計測条件下で得られる散乱波形にはノイズが少なく、細骨材の影響が無視できる程度であった。そのためここではモルタルを均質材料として扱うこととし、粗骨材の量を調整したコンクリートを配合し、用いることとした。

通常用いられているコンクリートの配合を基に粗骨材をふるいにより粗粒率付近の大きさのもの(5mm以上10mm以下)に選別した後に用いることとし、体積で20%これを含むようにモルタルの配合および量を決定した。その際にモルタル中のセメントと細骨材の配合、および配合全体の水セメント比が通常用いられて

いるコンクリートの配合と大きく異ならないことに留意した。このコンクリートの配合を表-1に示す。

表-1 粗骨材の体積率 20%のコンクリートの配合

セメント	水	細骨材	粗骨材(5~10mm)	W/C
590kg	195kg	1089kg	540kg (20vol.%)	0.33

(2) 計測装置および計測実験方法

ここではパルスエコー法により欠陥からの散乱波形を得る。パルスを入射波として送信した場合には欠陥モデルが十分に計測面から離れている場合において欠陥による散乱波形は縦波成分と横波成分とに分かれて計測される。ここでは $\hat{y}$ を 10° 間隔とし、36の縦波成分による散乱波形を計測した。これらは式(1)中の縦波成分である $A_m^L(k_L, \hat{y})D(k_L|y|)$ に対応するといえる。計測状況を図-5に示す。波形の記録に際しては、電気的なノイズの影響を減少させるために、256回の加算平均を行っている。接触型探触子は KARL DEUTSCH

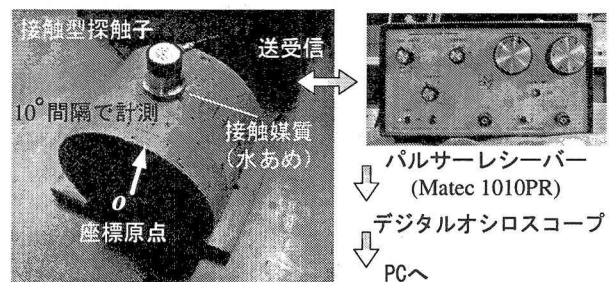


図-5 計測装置および計測実験状況

社製 S40 HB 0.3-1 (公称周波数帯域 0.3-1MHz)を用いた。アクリル直方体より得た時間域波形と周波数特性を図-6に示す。周波数 0.6MHz におけるコンクリート中の超音波の波長は 6mm 程度である。

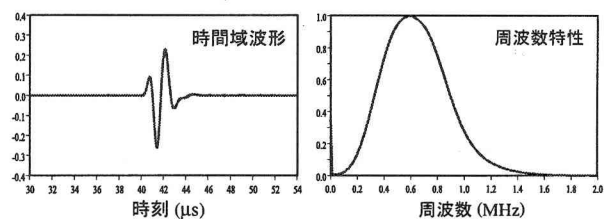


図-6 探触子(KARL DEUTSCH 社製 S40 HB 0.3-1)の時間域波形と周波数特性

4. 非均質材料から得られた波形データ処理方法の検討

式(2)と式(3)により欠陥形状を再構成するためには、散乱振幅 $A^L(k_L, \hat{y})$ が必要となる。

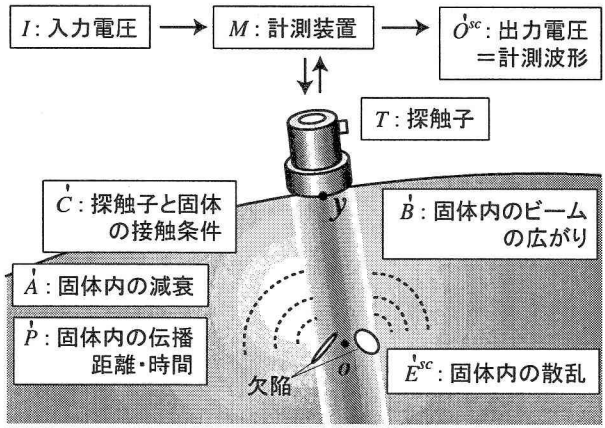
本研究では参照波形を用いて欠陥モデルからの散乱波形を処理し、散乱振幅に相当する成分を抽出し^{2,3)},

これを用いて欠陥形状の再構成を行う。

4.1 同じ非均質材料から計測した参照波形を用いた欠陥形状再構成

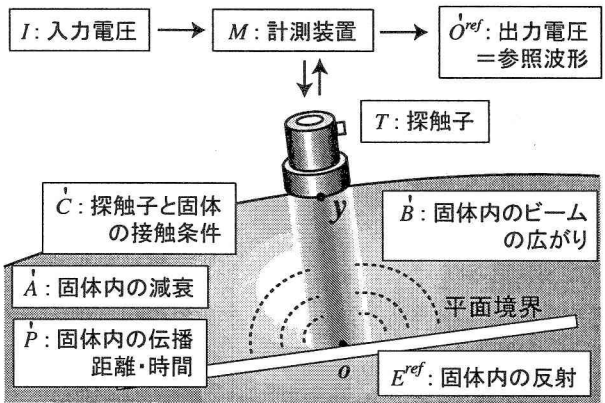
はじめに参照波形計測用供試体を欠陥モデルを有する供試体と同じコンクリート製とした場合について述べる。

(1) 波形データ処理方法



コンクリート製円柱供試体

(a) 欠陥モデルからの散乱過程のモデル化



参照波形計測用供試体

(b) 平面空洞からの反射過程のモデル化

図-7 散乱波形と参照波形に対する各種影響のモデル化

用いた計測系の線形性を仮定し、図-7(a)のように計測波形に対する各種の影響をモデル化すると¹²⁾、欠陥モデルからの散乱波形 $\hat{O}^{sc}$ は周波数域で次のように表すことができる。

$$\hat{O}^{sc}(f, y) = I(f)M(f)T_T(f)\hat{C}_T(f)\hat{A}_T(f)\hat{P}_T(f)\hat{B}_T(f) \times \hat{E}^{sc}(f, \hat{y})\hat{B}_R(f)\hat{P}_R(f)\hat{A}_R(f)\hat{C}_R(f)T_R(f) \quad (4)$$

ここで、 $I, M, T, C, A, P, B, E^{sc}$ はそれぞれ入力電圧、計測機器、探触子、探触子と固体の接触、固体内の減衰、固体内の伝播距離・時間、固体内のビームの広がり、固体内の散乱の影響を表している。また下付きの添え字の T は送信時、 R は受信時の影響を示しており、上付きの I は非均質物による影響を示している。

ここでは式(4)に示した積の形に変換された周波数域の散乱波形 $\hat{O}^{sc}(f, y)$ から固体内の散乱の影響 $\hat{E}^{sc}(f, y)$ を抽出したい。この時、別途用意した参照波形計測用の供試体から得られた参照波形を用いる。

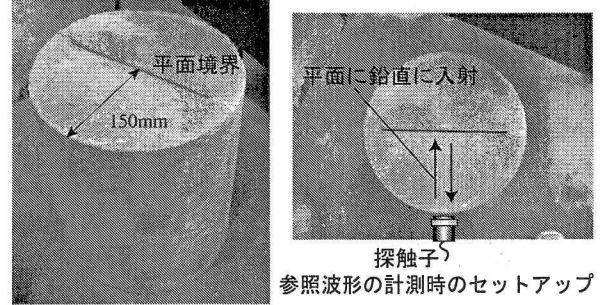


図-8 参照波形計測用供試体

ここで用いる参照波形計測用供試体は、欠陥を有する供試体と同じ材料、外形寸法を有しており、図-8に示したように中央に平面境界を有するものである。参照波形 $O^{ref}(t, y)$ はその平面から得られた反射波形である。計測は、 $O^{sc}(t, y)$ を得た時と同じ条件、計測機器構成で行われ、かつ入射波は平面空洞に垂直に入射し、反射していることに留意する。

得られた参照波形は図-7(b)を参照して周波数域で次のように表すことができる。

$$\hat{O}^{ref}(f, y) = I(f)M(f)T_T(f)\hat{C}_T(f)\hat{A}_T(f)\hat{P}_T(f)\hat{B}_T(f) \times E^{ref}\hat{B}_R(f)\hat{P}_R(f)\hat{A}_R(f)\hat{C}_R(f)T_R(f) \quad (5)$$

ここで、 E^{ref} は平面境界に平面弾性波が入射した場合の反射係数と考えることができ、周波数に依存しない定数として解析的に決定できる。また参照波形計測用供試体を欠陥を有する供試体と同じ材料、外形寸法としたことで式(4)を式(5)で除すことにより以下を得る。

$$\hat{E}^{sc}(f, \hat{y}) \approx E^{ref} \frac{\hat{O}^{sc}(f, y)}{\hat{O}^{ref}(f, y)} \quad (6)$$

上式を用いて得られた $\hat{E}^{sc}(f, \hat{y})$ を再構成式(2)、式(3)中の散乱振幅 A^L として用い、欠陥の形状再構成を行う。

(2) 欠陥モデル形状の再構成結果

式(6)を用いて得た $\hat{E}^{sc}(f, \hat{y})$ を再構成式(2)および式(3)に用いた結果を図-9、図-10および図-11に示す。ここでは無次元化縦波波数 $ak_L = 20.0$ までのデータを用いており、この最高波数に対応する最高周波数は円形空洞モデルと剥離鉄筋モデルで 0.82MHz ($a=16\text{mm}$)、ノッチ状欠陥モデルで 0.71MHz ($a=20\text{mm}$) である。またコンクリートの縦波波速には、付録Iで求めた $c_L = 4450\text{m/s}$ を用いた。

図中の Γ および γ は最大値で除して正規化した値を示しており、以降同様に表すこととする。コンクリート製供試体内部の欠陥に対しても、ボルン逆解析で得られた Γ は比較的良好に欠陥領域を再構成している。し

かしながらキルヒホフ逆解析により得られた γ は欠陥境界でわずかながら値を持つにとどまった。

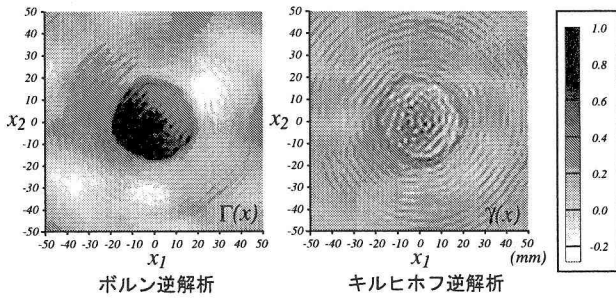


図-9 同じ非均質材料から計測した参照波形を用いた場合の円形空洞の再構成結果

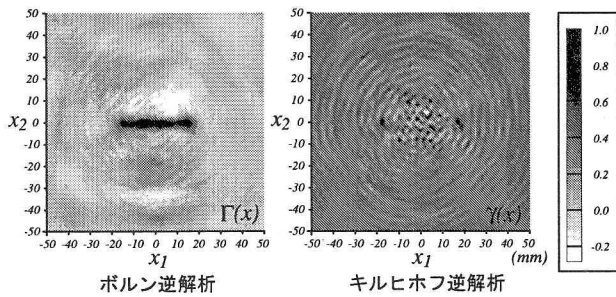


図-10 同じ非均質材料から計測した参照波形を用いた場合のノッチ状空洞の再構成結果

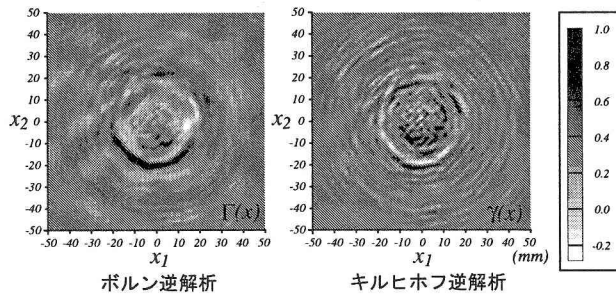


図-11 同じ非均質材料から計測した参照波形を用いた場合の剥離鉄筋モデルの再構成結果

4.2 均質材料からの参照波形を用いた場合の欠陥形状再構成

参照波形計測用の試験体の材料をコンクリートとすると、粗骨材からの散乱が参照波形に含まれることから、粗骨材の影響が形状再構成結果に含まれていると考えられる。また、本手法の実構造物への適用を考えたときに、計測したコンクリート構造物と同じ配合の参照波形用供試体を作成することは不可能である。そこで以下では参照波形を均質材料から計測することを考える。

別途用意した均質材料による供試体をデータ処理法の拡張により参照波形計測に用いることができれば、実計測前に参照計測を行いその波形を補正して参照波形として利用することが可能となり実用上優位であると考えられる。また、参照波形をデータベースのような形で

ストックしておくことも可能となる。以下では均質材料からの参照波形の利用を考える。

(1) 波形データ処理方法の検討

均質材料をもちいた参照波形計測用供試体から得られた波形に対する各種影響を、非均質材料における影響と同様に図-12に示すようにモデル化する。

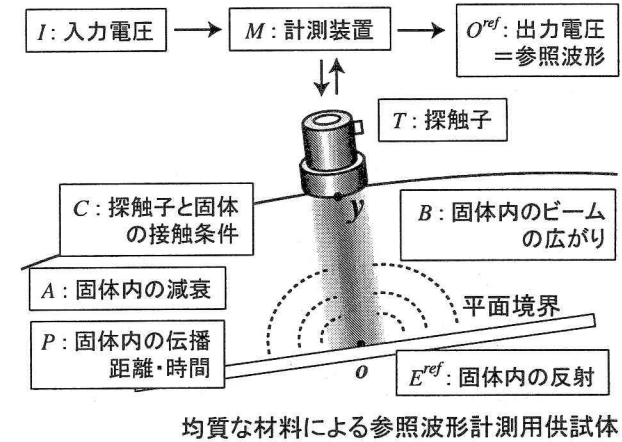


図-12 均質材料製供試体で得られる参照波形に対する各種影響のモデル化

このとき参照波形計測用供試体から計測される参照波形 O^{ref} は次のように表すことができる。

$$O^{ref}(f, y) = I(f)M(f)T_T(f)C_T(f)A_T(f)P_T(f)B_T(f) \times E^{ref}B_R(f)P_R(f)A_R(f)C_R(f)T_R(f) \quad (7)$$

いま、散乱波形と参照波形の計測において同一の探触子を使用すれば $B \approx \hat{B}$ とできる。また、参照波形計測において計測面の曲率及び接触媒質と、コンクリート製円柱供試体の計測面の曲率および接触媒質とが同一であれば $C \approx \hat{C}$ とできる。

上述の仮定の下、式(4)を式(7)で除せば、散乱振幅は次式のように表される。

$$\begin{aligned} \hat{E}^{sc}(f, \hat{y}) &= E^{ref} \frac{\hat{O}^{sc}(f, \hat{y})}{O^{ref}(f, y)} \frac{A_T(f)A_R(f)}{\hat{A}_T(f)\hat{A}_R(f)} \frac{P_T(f)P_R(f)}{\hat{P}_T(f)\hat{P}_R(f)} \\ &= E^{ref} \frac{\hat{O}^{sc}(f, \hat{y})}{O^{ref}(f, y)} A^*(f)P^*(f) \end{aligned} \quad (8)$$

ここで式(8)中の $A^*(f)$ の項には、非均質物の有無による散乱減衰の影響が含まれる。超音波が散乱体を含む材料中を伝播している場合には、その位相速度は因果律を意味する Kramers-Kronig 関係より散乱減衰量と関係づけられ周波数の関数となる^{13,14)}。そのため、非均質材料中では超音波の周波数により位相速度が変化することが考えられ、この項の影響を考慮する必要が生じる。

そこで、本研究では使用したコンクリート供試体に対して、別途付録Ⅰに示す位相速度の計測実験を行った。その結果位相速度は周波数に依存せずほぼ一定値となることからここでは散乱減衰の影響を無視することとした。

式(8)中の $P^*(f)$ の項については、欠陥モデルを有する供試体と参照波形計測用供試体とでは超音波の波速が異なることから供試体内部の伝播距離、時間が異なり、これを考慮する必要がある。

ここでは伝播距離、時間の影響を以下のようにモデル化する^{6,12)}。

$$P(f) = e^{ik_L|y|} = e^{i\frac{2\pi f}{c_L}|y|} \quad (9)$$

このとき式(8)は次のように表される。

$$\begin{aligned} \dot{E}^{sc}(f, \hat{y}) &\approx E^{ref} \frac{\dot{O}^{sc}(f, y) e^{2ik_L|y|}}{O^{ref}(f, y) e^{2ik_L|y|}} \times \text{const.} \\ &\approx E^{ref} \frac{\dot{O}^{sc}(f, y)}{O^{ref}(f, y)} e^{4i\pi f \left(\frac{1}{c_L} - \frac{1}{c_L}\right)|y|} \times \text{const.} \end{aligned} \quad (10)$$

以下では、上述のデータ処理を用いて計測波形より $\dot{E}^{sc}(f, \hat{y})$ を求め、形状再構成能を実験的に検証する。

(2) 欠陥モデル形状の再構成結果

ここでは参照波形計測用供試体を構成する均質材料を、製作の容易さからセメントペーストとして作成した。得られた参照波形と式(10)を用いて得た $\dot{E}^{sc}(f, \hat{y})$ を、再構成式(2)および式(3)に用いた。実験計測、および逆散乱解析の条件は4.1と同じとした。結果を図-13、図-14および図-15に示す。また参考として付録IIに図-14に用いた散乱波形および参照波形を示した。

ボルン逆解析法およびキルヒホフ逆解析法の双方で欠陥像を正しい大きさと再構成できている。また、これらを図-9、図-10および図-11と比較すると、欠陥モデル部とその他の領域とのコントラストが向上しており、特にキルヒホフ逆解析法で顕著である。

5. コンクリートの配合を変化させた場合の最構成能の検討

最後に粗骨材の体積率を一般的なコンクリートに含まれる粗骨材の体積率とほぼ等しい37%とした供試体に対する検討結果を示す。

ここではコンクリートの内部に直径32mmの円形空洞を有する供試体を作成した。このコンクリートの配合を表-2に、作成した供試体を図-16に示す。

表-2 粗骨材の体積率37%のコンクリートの配合

セメント	水	細骨材	粗骨材(5~10mm)	W/C
360kg	172kg	771kg	968kg (20vol.%)	0.47

再構成結果を図-17に示す。比較として、供試体と同じ非均質材料から計測した参照波形を用いた結果を図-18に示す。逆散乱解析には、無次元化縦波波数 $ak_L = 20.0(a=16\text{mm})$ までの散乱振幅データを用いており、こ

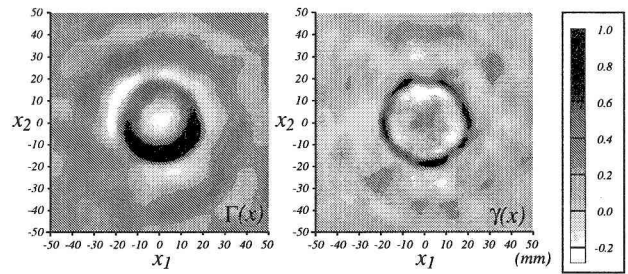


図-13 均質材料から計測した参照波形を用いた場合の円形空洞の再構成結果

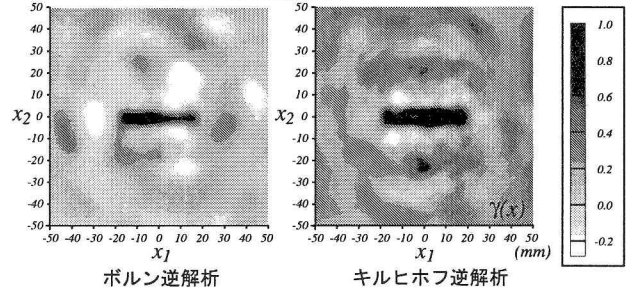


図-14 均質材料から計測した参照波形を用いた場合のノッチ状空洞の再構成結果

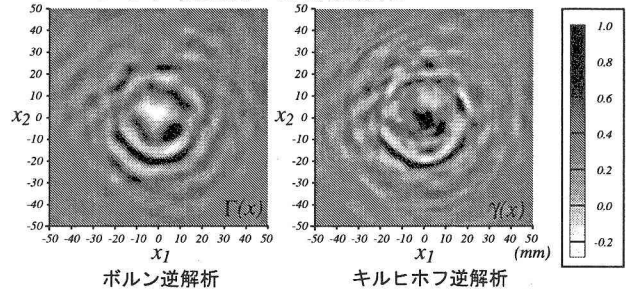


図-15 均質材料から計測した参照波形を用いた場合の剥離鉄筋モデルの再構成結果

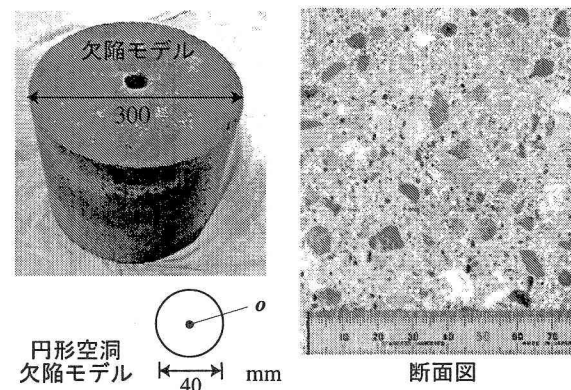


図-16 コンクリート製円柱供試体(円形空洞欠陥モデル、粗骨材の体積率37%)の外観および断面

の最高波数に対応する最高周波数0.82MHzである。またコンクリートの縦波波速には、付録Iに示す位相速度の計測により求めた $c_L = 4100\text{m/s}$ を用いている。

再構成結果から、粗骨材の体積率を37%のコンクリートにおいても均質材料から計測した参照波形を用いた場合には再構成像が改善されていることがわかる。

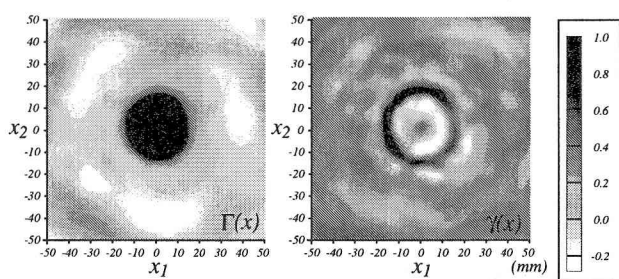


図-17 均質材料から計測した参照波形を用いた場合の円形空洞の再構成結果 (粗骨材の体積率 37 %)

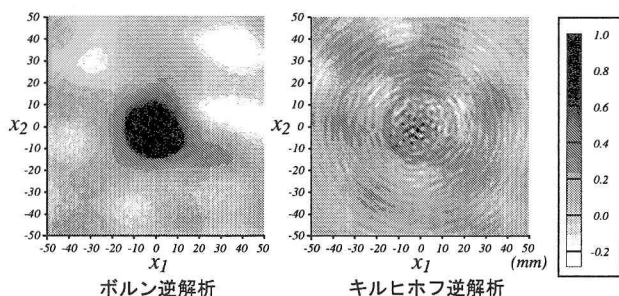


図-18 同じ非均質材料から計測した参照波形を用いた場合の円形空洞の再構成結果 (粗骨材の体積率 37 %)

6. 結論

本研究では、線形化逆散乱解析法の土木構造物への適用をにらんでコンクリート製供試体を作製し、欠陥モデルの形状再構成を試みた。本手法では欠陥形状再構成に必要な散乱振幅に相当する成分を、参照波形を用いたデータ処理を行うことで超音波計測により得た散乱波形より抽出しているが、その際に別途用意した均質材料から計測した参照波形を用いるデータ処理方法を提案し、実験計測により欠陥形状再構成能を確かめた。その結果、供試体と同じ材料を用いて参照波形を得る方法と比較して鮮明な欠陥形状再構成像を得られることがわかった。また本手法を用いることで実計測前に参照計測を行い、その波形を補正して参照波形として利用することが可能となり、実用上優位であると考えられる。

謝辞：本研究の遂行にあたり故北原道弘教授には闘病中にもかかわらず温かいご指導と多大なご助言を賜りました。私どもに線形化逆散乱解析法のアイデアを残して下さった同教授に深謝すると共にご冥福をお祈り致します。

また本研究の一部は平成 15 年度 土木構造物の非破壊診断技術の確立評価業務 (国土交通省東北地方整備局東北技術事務所) の一環として行われました。ご協力頂きました国土交通省の阿部新治氏、新田哲雄氏、南條浩徳氏に謝意を表します。

付録 I コンクリートを伝播する超音波の位相速度計測

コンクリート製円柱供試体の欠陥モデルにより散乱された波形に対して、均質な材料製の参照波形用供試体から得た参照波形を用いてデータ処理を行うに際して、位相速度の周波数変化の有無を確認する必要がある。ここでは本研究で用いた超音波の位相速度の計測法について述べると共に、用いたコンクリート中の超音波の位相速度の計測結果について示す。

(1) 位相速度の計測方法

用いた供試体は粗骨材の体積率 20 %、および 37 % のコンクリート製で直径が 100mm の円柱状の供試体であり、配合は表-1および表-2に示した。これらは本文中で述べた供試体の打設時に同時に作成した。

計測の概要を図-19に示す。ここではファンクションジェネレータで周波数を固定した sin 波 5 波を送信することとした。用いた探触子は本文中で用いたものと同じ KARL DEUTSCH 社製 S40 HB 0.3-1 である。

はじめにピッチキャッチ法¹⁾で透過波形を捕らえ、オシロスコープの画面上に記録する。その後パルスエコー法により 1 回反射波形を計測しオシロスコープのディレイ機能を利用して先のピッチキャッチ法で捕らえた透過波形に同位相の位置となるように重ね合わせる。この時の遅延時間 Δt が位相速度の意味で超音波が供試体の長さ l を伝播する時間に相当し、これらから位相速度を求めた。

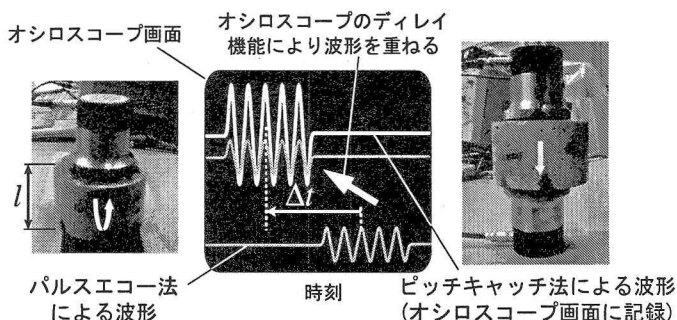


図-19 位相速度計測の方法の概要

同様の方法にパルスオーバーラップ法¹⁵⁾があるが、供試体中で超音波の減衰が大きく、供試体中を往復するパルス列を観測出来なかったことから上述の方法を取るに至った。

(2) 位相速度の計測結果

粗骨材体積率 20 % と 37 % のコンクリート供試体について、位相速度の計測結果の一例を図-20に示す。

位相速度は用いた探触子の公称周波数帯域 0.3~1.0MHz 内で周波数に依存せず、ほぼ一定値

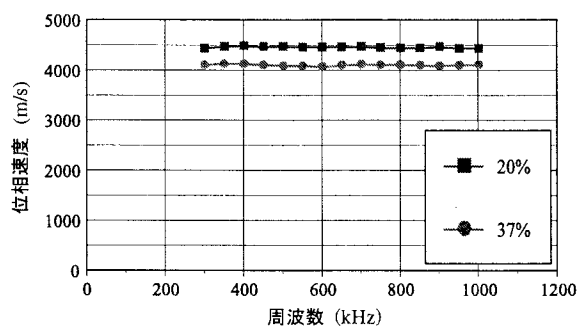


図-20 各周波数における位相速度の計測結果

を示した。

複数の供試体を用いて計測した位相速度の平均値を求めると、粗骨材の体積率が20%のコンクリートでは4450m/s、粗骨材の体積率が37%のコンクリートでは4100m/sであった。これらの値を本研究では超音波の縦波波速として用いている。

付録 II 計測波形例 (ノッチ状欠陥モデル)

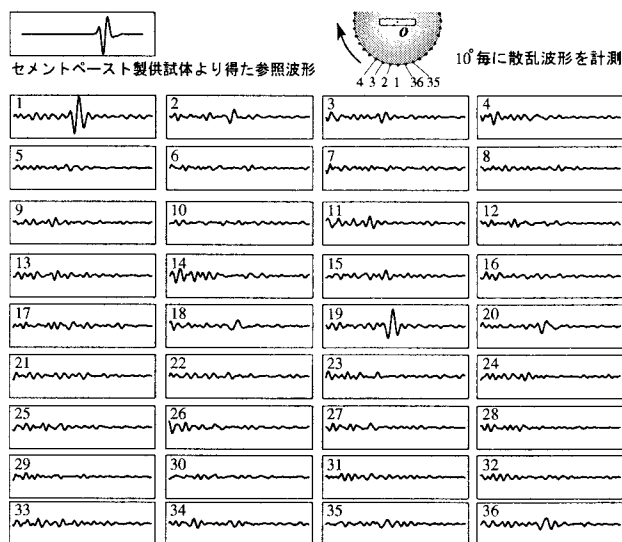


図-21 図-14 に用いた散乱波形および参照波形

参考文献

- 1) 非破壊検査協会 (編), 新非破壊検査便覧, 日刊工業新聞社, 1992.

- 2) 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に関する考察, 応用力学論文集, Vol.3, pp.91-98, 2000.
- 3) 中畑和之, 大西正浩, 北原道弘: 線形化逆散乱解析の高速化と欠陥形状再生への適用, 応用力学論文集, Vol.5, pp.67-74, 2002.
- 4) 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.
- 5) 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, Vol.745/I-65, pp.143-153, 2002.
- 6) 中畑和之, 北原道弘: 低周波を利用した構造部材内の欠陥再構成手法の提案, 応用力学論文集, Vol.6, pp.1073-1080, 2003.
- 7) Nakahata, K. and Kitahara, M.: Shape reconstruction of defects in inhomogeneous material, *Rev. Prog. Quant. Nondestruct. Eval.*, Vol.21A, pp.99-106, 2002.
- 8) Rose, J.H. and Krumhansl, J.A.: Determination of flaw characteristics from ultrasonic scattering data, *J. Appl. Phys.*, Vol.50, pp.2951-2952, 1979.
- 9) Thompson, R.B.: Status of implementation of the inverse Born sizing algorithm, *Rev. Prog. Quant. Nondestruct. Eval.*, Vol.4, pp.611-621, 1985.
- 10) Cohen, J.K. and Bleistein, N.: The singular function of a surface and physical optics inverse scattering, *Wave Motion*, Vol.1, pp.153-161, 1979.
- 11) Bleistein, N. and Cohen, J.K.: Progress on a mathematical inversion technique for non destructive evaluation, *Wave Motion*, Vol.2, pp.75-81, 1980.
- 12) Schmerr, L.W.: *Fundamental of Ultrasonic Nondestructive Evaluation*, Plenum Press, New York, 1998.
- 13) Brauner, N. and Beltzer, A.I.: The Kramers-Kronig relations method and wave propagation in porous elastic media, *Int. J. Eng. Sc.*, Vol.23, No.11, pp.1151-1162, 1985.
- 14) Sayer, C.M. and Smith, R.L.: Ultrasonic velocity and attenuation in an epoxy matrix containing lead inclusions, *J. Phys. D.: Appl. Phys.*, Vol.16, pp.1189-1194, 1983.
- 15) 根岸勝雄, 高木堅志郎: 超音波技術, 東京大学出版会, 1984.

(2004 年 4 月 16 日 受付)