

I - 6 線形化逆散乱解析法による非均質材料内の欠陥形状の再構成

○東北大学大学院 学生員 大西正浩
 東北大学大学院 正 員 山田真幸
 東北大学大学院 正 員 北原道弘

1. はじめに

散乱体からの散乱波形を用いて散乱体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る。本手法は、低周波成分データを有効利用するため¹⁾、大規模性、非均質性を有する土木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されている。既往の研究では、均質材料の内部欠陥を対して、本手法の適用性が確認されている²⁾。そこで、本研究では被検査対象がコンクリートなどの非均質材料である場合に対してデータ処理方法を提案し、接触型探触子を用いて計測された波形から、欠陥形状の再構成を行う。

2. 線形化逆散乱解析法

図-1に示すような等方均質な2次元無限弾性体D内に空洞欠陥D^cが存在している場合を考える。同じ探触子で超音波を送受信するパルスエコー法を考え、無限遠に存在する境界S[∞]上の点yから点oに向けて入射波uⁱⁿを送信し、欠陥D^cによる散乱波u^{sc}を同じ点yで受信する。この散乱波形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⁾に詳しい。以下では、欠陥形状の再構成に用いる二つの式のみを示す。

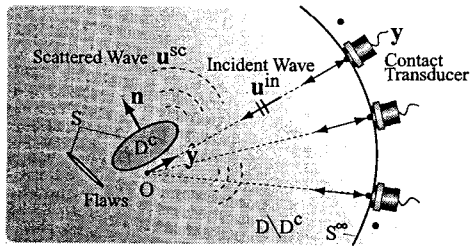


図-1 空洞欠陥の存在する弾性波動場

2.1 ボルン逆散乱法

ボルン近似を適用した散乱振幅 $A^\alpha(k_\alpha, \hat{y})$ 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 $\Gamma(x)$ は次式のように表される。

$$\Gamma(x) = \frac{-2}{\pi^2 u^0} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{1}{k_\alpha} A^\alpha(k_\alpha, \hat{y}) e^{2ik_\alpha \hat{y} \cdot x} dk_\alpha d\hat{y} \quad (1)$$

ここで、 k_α は波数($\alpha = L, T$)、 $\hat{y}$ は送信焦点oからyへ向く単位方向ベクトル、 u^0 は入射波の振幅である。

2.2 キルヒホフ逆散乱法

キルヒホフ近似を適用した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 $\gamma(x)$ は次式のように表される。

$$\gamma(x) = \frac{-2}{\pi^2 u^0} \int_0^{2\pi} \int_0^\infty A^\alpha(k_\alpha, \hat{y}) e^{2ik_\alpha \hat{y} \cdot x} dk_\alpha d\hat{y} \quad (2)$$

以下では、式(1)と式(2)に、計測波形からデータ処理により抽出される散乱振幅 $A^\alpha(k_\alpha, \hat{y})$ を使用して、欠陥形状を表す関数 $\Gamma(x)$ と $\gamma(x)$ を求め、欠陥形状を再構成する。ここで、高速計算を行うために、式(1)、式(2)の積分に二次元高速フーリエ変換を用いる。

3. 超音波実験装置と円柱供試体

図-2に示すような計測装置を用いて、パルスエコー法による超音波実験を行う。パルサーにより探触子を駆動して、パルス状の超音波を供試体内に入射し、内部の骨材や欠陥による散乱波を同じ探触子で受信する。この受信波形データをパソコンへ転送し、データ処理や逆散乱解析を行う。

円柱供試体には、図-3中のSpecimen Aに示すノッチ型空洞の存在する粗骨材率20%のコンクリート円柱供試体と図-3中のSpecimen Bに示す円形空洞の存在する粗骨材率37%のコンクリート円柱供試体を用意した。また、参照波形用の供試体として、図-3中の

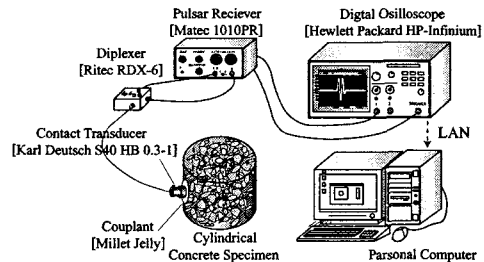


図-2 超音波実験装置

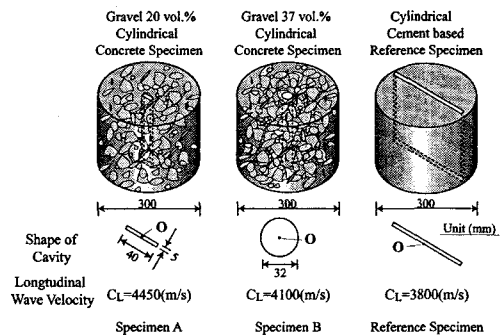


図-3 円柱供試体と内部空洞

Reference Specimen に示す平面空洞を有するセメントペースト円柱供試体も用意した。

計測においては、接触型探触子と供試体との接触媒質として水あめを用い、10° 間隔で一定面内を一回転させて全向からの散乱波形を計測した。

4. データ処理方法

線形システム論を基にした Schmerr によるモデル化³⁾を参考に、図-4(A)に示すような影響を考慮すれば、非均質材料内の欠陥からの散乱波形 $\hat{O}^{sc}$ は周波数域で次のように表すことができる。

$$\hat{O}^{sc}(f, y) = I(f)M(f)T_T(f)\hat{C}_T(f)\hat{A}_T(f)\hat{P}_T(f)\hat{B}_T(f) \times \hat{E}^{sc}(f, \hat{y})\hat{B}_R(f)\hat{P}_R(f)\hat{A}_R(f)\hat{C}_R(f)T_R(f) \quad (3)$$

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 $\hat{\cdot}$ は非均質材料を示している。

次に、図-4(B)に示すような影響を考慮すれば、均質材料内の平面空洞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。

$$O^{ref}(f, y) = I(f)M(f)T_T(f)C_T(f)A_T(f)P_T(f)B_T(f) \times E^{ref}B_R(f)P_R(f)A_R(f)C_R(f)T_R(f) \quad (4)$$

ここで、 E^{ref} は平面空洞による反射係数である。

いま、散乱波と参照波の計測において、同一の探触子を使用すれば $B \approx \hat{B}$ とでき、また、円柱供試体の接触面の曲率と使用する接触媒質が同一であれば $C \approx \hat{C}$ とできると考えられる。このことを考慮し、式(3)を式(4)で除せば、散乱振幅は次式のように表される。

$$\hat{E}^{sc}(f, \hat{y}) = E^{ref} \frac{\hat{O}^{sc}(f, y)}{O^{ref}(f, y)} \frac{A_T(f)A_R(f)P_T(f)P_R(f)}{\hat{A}_T(f)\hat{A}_R(f)\hat{P}_T(f)\hat{P}_R(f)} \quad (5)$$

式(5)中の $\frac{A_T(f)A_R(f)P_T(f)P_R(f)}{\hat{A}_T(f)\hat{A}_R(f)\hat{P}_T(f)\hat{P}_R(f)}$ の項には、非均質体の有無による散乱減衰と位相速度の影響が含まれると

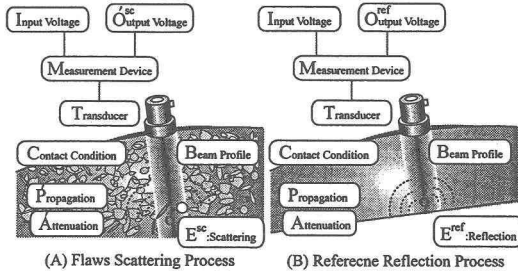


図-4 散乱波形と参照波形

考えられる。そこで、本研究ではこれらの影響を考慮するために、使用したコンクリート供試体に対して、別途、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結果が得られ、また、位相速度と散乱減衰量が密接に関係していることから、これらの影響を無視することとした。したがって、非均質材料と均質材料での群速度の違いのみを考慮すれば良いと考えられるため、伝播距離・時間の影響を $P(f) = e^{ik_\alpha|y|} = e^{i\frac{2\pi f}{c_\alpha}|y|}$ とモデル化すれば³⁾、式(5)は次のように表される。

$$\hat{E}^{sc}(f, \hat{y}) \propto E^{ref} \frac{\hat{O}^{sc}(f, y)}{O^{ref}(f, y)} e^{4i\pi f(\frac{1}{c_L} - \frac{1}{c_L})|y|} \quad (6)$$

この処理により群速度の補正が行われ、計測波形から散乱振幅を抽出することが可能となる。

5. 再構成結果

無次元化縦波波数 $ak_{Lmax} = 20.0$ までの散乱振幅を用いて逆散乱解析を行った。ここで、 a は欠陥の代表長であり、円形空洞の場合はその半径としている。

図-6に再構成結果を示す。上で提案したデータ処理方法を適用し、群速度の補正を行うことにより、非均質材料内部の欠陥に対しても、左図で示したボルン逆散乱法は欠陥領域を、右図で示したキルヒホフ逆散乱法は欠陥境界を点線で示した正しい大きさと再構成できていることがわかる。

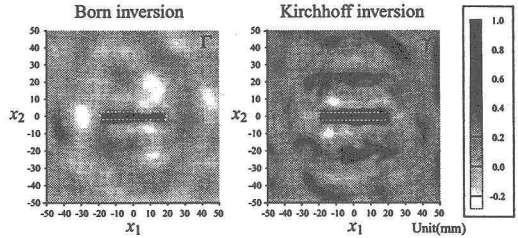


図-5 Specimen A の再構成結果

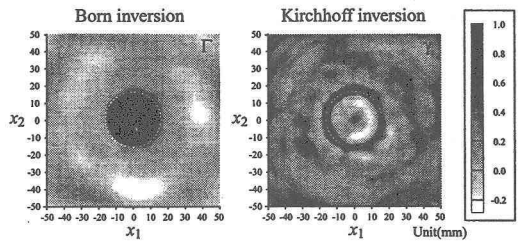


図-6 Specimen B の再構成結果

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に関する考察, 応用力学論文集, Vol.3, pp.91-98, 2000.
- 2) Nakahata, K.: Applications of inverse scattering methods to flaw reconstruction in elastic material, Doctoral thesis, Tohoku University, 2003.
- 3) Schmerr, L.W.: Fundamental of Ultrasonic Nondestructive Evaluation, Plenum Press, New York, 1998.