

滞水状態の円柱状空洞を対象としたコンクリート内部可視化手法の検討

福井大学 学生会員 ○五藤 高弘
福井大学 正会員 鈴木 啓悟

1. 研究背景と目的

プレストレストコンクリート(PC)構造物内部のPCグラウト未充填箇所が水が滞水することでPC鋼材の腐食、破断が発生し、耐荷力の損失に係わる重大な問題となることがある。このため、点検調査において現状の様々な非破壊検査手法の適用が検討されているが、超音波を使用する場合ではグラウトの空隙内部が滞水状態である場合、空隙からの散乱振幅が小さくなり、グラウト未充填箇所を見落とす可能性がある。そこで本研究では超音波探傷によって得られた波形データに線形化逆散乱解析に基づく欠陥像再構成手法と、寄生的離散ウェーブレット変換による波形処理手法を適用し、直接目視困難な構造物内部のPCグラウト未充填箇所の把握や、未充填箇所が空隙もしくは滞水、それぞれの状態であることを可視判断する手法の提案を目的とする。

2. 線形化逆散乱解析による欠陥再構成手法

本研究ではキルホフ近似に基づく線形化逆散乱解析を用いて、超音波探傷により得られた波形データの画像化処理を行う。逆散乱解析法は図-1に示すように、多点で計測された散乱波の積分表現を基に計測散乱波形から逆に欠陥の形状を再構成するための解析手法である。以下に欠陥境界部を再構成するキルヒホフ逆散乱解析の再構成式を示す。

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

3. 寄生的離散ウェーブレット変換による波形処理

コンクリート試験体を超音波探傷して得た波形データには空隙や骨材によるノイズが含まれており、欠陥像がノイズに比して不鮮明になることがあるため、欠陥からの散乱波成分を抽出する必要がある。非定常信号の解析に広く用いられている離散ウェーブレット変換(DWT)はマザーウェーブレット(MW)と呼ばれる関数組を用いて対象となる信号を低周波成分(Approximation)と高周波成分(Detail)に分解、再構成することで目的とする周波数帯を抽出できる。

本研究ではこれを応用した寄生的離散ウェーブレット変換(P-DWT)²⁾を用いる。P-DWTは実波形に含まれる欠陥からの散乱波をもとに独自のマザーウェーブレット(RMW)を作成する。得られたRMWに対応した周波数領域フィルタ(寄生フィルタ)をベースとなる既存のMWを用いて構成し、従来のDWTの分解フローに任意のレベルで付与することで、より高精度に目的信号を抽出する手法である。

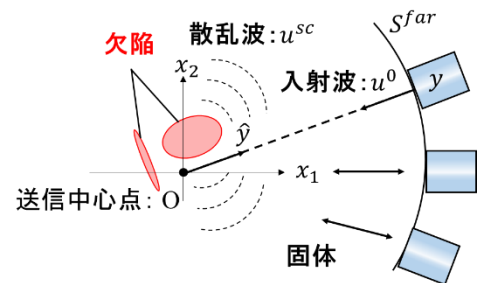


図-1 線形化逆散乱解析の概要



図-2 試験体①

図-3 試験体②

4. 超音波探傷実験

本実験で用いた試験体①、試験体②を図-2、図-3に示す。試験体①は試験体内部に鉄筋及び空洞欠陥を模した円形のスタイロフォームの両方を有しているコンクリート試験体で、試験体の直径は約310mm、鉄筋と空洞欠陥は共に直径約40mmである。これらの欠陥の位置や形状の可視的把握を試みる。

試験体②は中央に塩化ビニル製の円柱状の空洞を有するコンクリート試験体で、試験体の直径は約310mm、空洞の大きさは外径約48mm、内径約40mmである。この試験体の円柱状空洞内に水を入れた滞水状態と入れる前の非滞水状態で超音波探傷実験を行い、両状態の差別化を試みる。

(a)計測機器

超音波探傷器はジャパンプローブ株式会社製のパルサレシーバJPR-600C、探触子は同社製の200kHz広帯域垂直探触子B0.2K45×45Nを二つ使用した。また、接触媒質としてコンクリート用ソニコートを使用した。

(b)計測方法

探傷実験は二探触子法にて行った。探触子同士の距離を一定にしながら二つの探触子を上下に配置し、試験体の全周を10°間隔で0°から350°までの計36点計測した。また、1点計測を行う毎に探触子と試験体との間にソニコートの塗布を行った。

5. 逆散乱解析による画像化結果

試験体①と試験体②の滞水状態、非滞水状態それぞれで計測した波形にキルホフ逆散乱解析を

キーワード 円柱状空洞、滞水状態、超音波探傷、線形化逆散乱解析、寄生的離散ウェーブレット変換

連絡先 福井大学 〒910-8507 福井県福井市文京 3-9-1 TEL 0776-27-8596 FAX 0776-27-8746

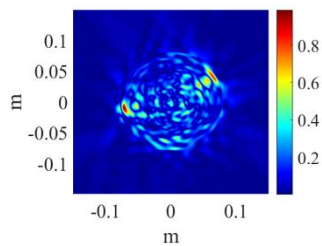


図-4 試験体①の画像化結果

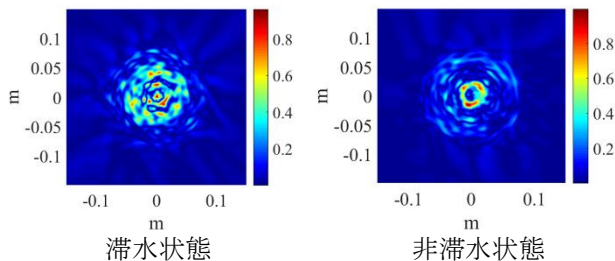


図-5 試験体②の画像化結果

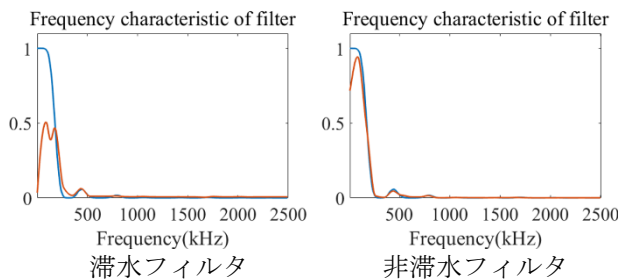


図-6 寄生フィルタの周波数特性

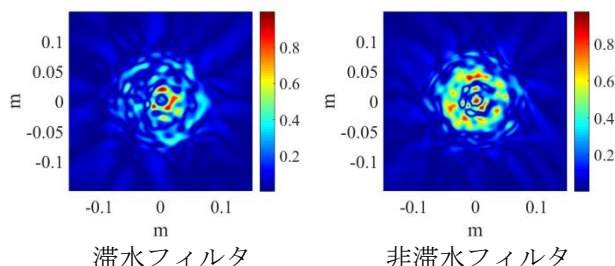


図-7 滞水状態における寄生フィルタ適用結果

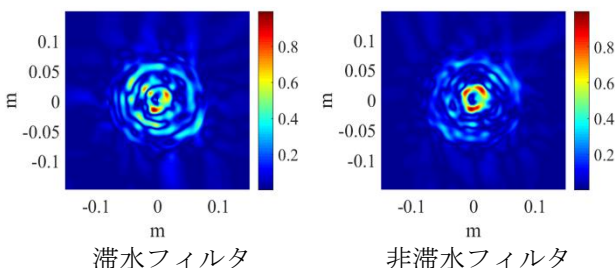


図-8 非滞水状態における寄生フィルタ適用結果

適用し、画像化した結果をそれぞれ図-4、図-5に示す。試験体①では画像左側に空洞、右側に鉄筋の欠陥像が現れているものの、若干の粗骨材や微細な空隙からの散乱によるノイズが見られ、鉄筋と空洞欠陥の判別はやや難しい結果となった。試験体②では非滞水状態においては、円柱状空洞の欠陥像の位置、形状が概ね把握できる結果となった。対して滞水状態においては、円柱状空洞の欠陥形状が不鮮明となり、ノイズも多く見られた。この原因として水と塩化ビニル管の音響インピー

ダンスの値の差が空気と塩化ビニル管との差に比べ小さく、滞水状態では円柱状空洞からの反射波が弱かったと考えられる。

6. 寄生フィルタによる画像処理

ノイズ除去と欠陥像の高精度化を目指すため、試験体②において寄生フィルタによる画像処理を試みる。試験体②の滞水状態、非滞水状態より得られた波形からそれぞれ滞水フィルタ、非滞水フィルタを構成し、両者を滞水状態、非滞水状態にてDWTの分解レベル4に付与しフィルタリングを施した後、再度キルヒホフ逆散乱解析による画像化を行った。ベースとなる既存のマザーウェーブレットにはdb5(Daubechies5)を選択した。図-6に作成したレベル4の滞水フィルタと非滞水フィルタを示す。比較として、レベル4に対応するdb5の周波数特性も示している。db5の範囲内に作成したフィルタの周波数領域が含まれているため、特徴成分の抽出は可能であることが分かる。

滞水状態での結果を図-7に、非滞水状態での結果を図-8に示す。滞水状態では、滞水フィルタを適用した場合に欠陥像の鮮明化とノイズの減少が確認できた。また、非滞水状態では、非滞水フィルタを適用した場合にはより欠陥形状の強調がされ逆に滞水フィルタを適用した場合には欠陥形状が不鮮明となり、若干のノイズも見られた。

7. 結論

本研究では試験体内部に鉄筋及び空洞欠陥を模した円形のスタイロフォームの両方を有しているコンクリート試験体(試験体①)と、中央に塩化ビニル製の円柱状の空洞を有するコンクリート試験体(試験体②)の滞水状態と非滞水状態において二探触子法による超音波探傷実験を行い、得られた波形データに対し線形化逆散乱解析を適用して欠陥像の再構成を試みた。また試験体②において、実波形より寄生フィルタを作成しフィルタリングを施すことで、画像化精度の向上を試みた。以下に得られた知見を示す。

1. インピーダンスの近い異種材料を有する試験体を超音波探傷し画像化を行うと、欠陥の特定が困難となる傾向が見られ、特に試験体②の円柱状空洞に水を入れた滞水状態においては欠陥像が不鮮明となり、ノイズも多く見られる結果となった。
2. 画像化結果が不鮮明であった試験体②の滞水状態において、滞水状態で得られた波形より構成した滞水フィルタを適用することで比較的精度良く欠陥像の画像化が可能となった。また、非滞水状態において滞水フィルタを適用すると逆に欠陥形状が不鮮明となった。

参考文献

- 1) 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
- 2) 章忠, 池内広樹, 斎木典保, 今村孝, 石井秀明, 戸田浩, 三宅哲夫: 寄生的離散ウェーブレット変換およびその異常信号検出への応用, 日本機械学会論文集(C編), Vol.75, No.757, pp.163-170, 2009