

コンクリート構造物の打音検査に関する時間一周波数解析を用いた基礎的研究

九州大学工学部 学生会員 ○山田 裕志
九州大学大学院 学生会員 川端 健太
九州大学大学院 正会員 園田 佳巨

1. 緒言

コンクリート構造物の健全性を評価する方法として、多くの非破壊検査法が開発されている。その中でも打音法は、簡易かつ低コストのため、手軽な診断法として良く用いられている。一般に音データの評価は、フーリエ変換による周波数領域で行われているが、フーリエ変換による結果には時間に関する情報が失われ、「いつの時点でどのような周波数帯の音が発生しているか」確認できないため、コンクリート内部の欠陥による影響を明確に把握することが困難である。そこで本研究では実際に劣化損傷が認められるコンクリート構造物を対象に、図-1のような回転式打音検査器を用いて打音検査を実施し、得られた打音データにウェーブレット変換を用いた時間一周波数解析を行い、フーリエ変換の結果と比較することで、時間一周波数解析の意義を考察する。

2. 橋梁調査について

現在も供用中のA橋を対象に、図-1に示すような回転式打音検査器を用いた調査を行った。回転式打音検査では、打撃力のバラつきが小さいだけでなく、打撃点を移動させながら検査を行うことから、従来の点検用ハンマーとは異なり、健全と欠陥の違いを聞き比べた診断が可能である。

計測は、コンクリート表面上で検査器を転がしながら打撃していき、他の場所と打音の音質が明らかに異なる部分を抽出することで欠陥部を検出した。写真-1は、欠陥部検査箇所の一例を示したもので、矢印のように直線上に検査を行った際の発生打撃音をICレコーダーで録音した。

写真-1の場所で得られた音圧の時刻歴波形を図-2に示す。この図の中で、音圧が大きくなっている部分が欠陥箇所であると考えられ、この検査範囲内では欠陥が2箇所あるものと判断した。次に、打音の周波数解析を行うため、図-2の赤で囲まれた部分に対してそれぞれフーリエ変換を施した。その結果を図-3に示す。図-3より、健全部と欠陥部でスペクトルの形状が異なることが認められた。全体的に欠陥部の方が低周波域のスペクトルが卓越する場合が多い傾向にあるが、必ずしも卓越周波数域を特定できるわけではなく、ピーク周波数の情報だけで欠陥部と健全部を識別することは困難であることがわかる。そこで、時間一周波数解析を行い、周波数解析による結果との欠陥部の識別の容易さに関する相違を考察する。

3. 時間一周波数解析の概要

代表的な時間一周波数解析に、短時間フーリエ変換とウェーブレット変換がある。短時間フーリエ変換は一定の時間幅ごとにフーリエ変換を施すことによって、時間情報を

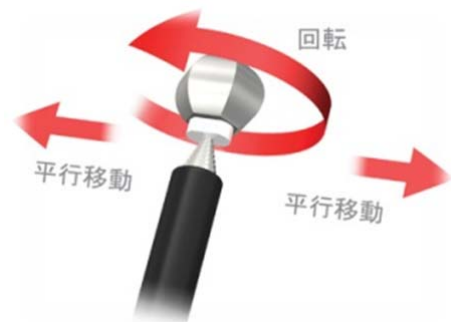


図-1 回転式打音検査器

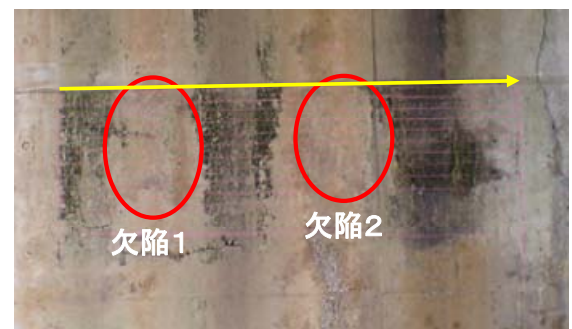


写真-1 検査箇所

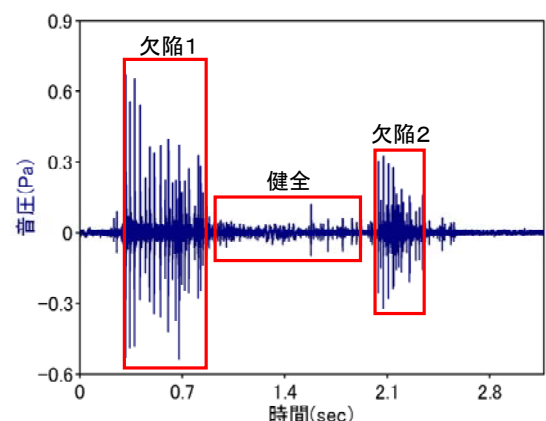


図-2 音圧の時刻歴波形

失わずに周波数解析を行うことができるが、時間幅（窓幅）を固定して解析を行うことから、周波数帯によって検知能力が低下する可能性がある。一方、ウェーブレット変換は、短時間フーリエ変換の短所（窓幅一定）を改善したもので、窓幅を対象周波数別に変えることで、広範囲の周波数領域で一定精度の解析を行うことが可能である。ウェーブレット変換の具体的な計算手順は、以下に示す基底 $\phi(t)$ を用いて

$$\phi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \phi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

式(2)で定義される。

$$\tilde{x}(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \phi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2)$$

ここに、 $\tilde{x}(a,b): x(t)$ のウェーブレット変換、

a および b は、それぞれ基底を周波数域に伸縮させるためのスケールパラメータと時間軸で移動させるためのシフトパラメータである。

今回のウェーブレット変換では、時間領域および周波数領域のいずれにおいても安定した解析精度を保つことができると言われている Morlet 基底をマザーウェーブレットとした。Morlet 基底を式(3)に示す。

$$\phi(t) = \pi^{-1/4} e^{8it} e^{-t^2/2} \quad (3)$$

4. フーリエ変換とウェーブレット変換の比較

ウェーブレット変換で得られたスペクトルを図-4 に示す。図中の赤く表示している周波数域は音圧が大きくなっているため、欠陥部であると推定される。図-4 より、2箇所、2箇所の赤色表示の時間帯とその他の時間帯で音圧レベルが異なることから、健全部と欠陥部の識別が容易にできることがわかる。また、欠陥1は2000Hz付近の低周波域で音圧が大きいのに対して、欠陥2では広範囲の周波数域で音圧が大きくなっており、コンクリート内部の欠陥状態が両者で異なっていることが推察される。したがって、打音データにウェーブレット変換を行うことで、図-2の波形が有する時間情報と図-3の波形が有する周波数情報の両方を合わせた評価が可能となり、欠陥状態の識別能力が大きく向上することが認められた。

5. 結言

欠陥箇所を特定するだけであれば、回転式打音検査器を用いて計測した音圧の時刻歴波形だけで判断できるが、打音データにウェーブレット変換を行えば、同時にピーク周波数域の相違も考察することによって欠陥状態の推定も可能となりうることがわかった。この利点は、フーリエ変換では得られないもので、打音データに対する時間一周波数解析の有用性は明白であると考えられる。今後の課題として、コンクリート内部の欠陥の有無だけでなく、欠陥の状態（範囲、程度）の定量的な推定が可能となる手法を確立することが挙げられる。

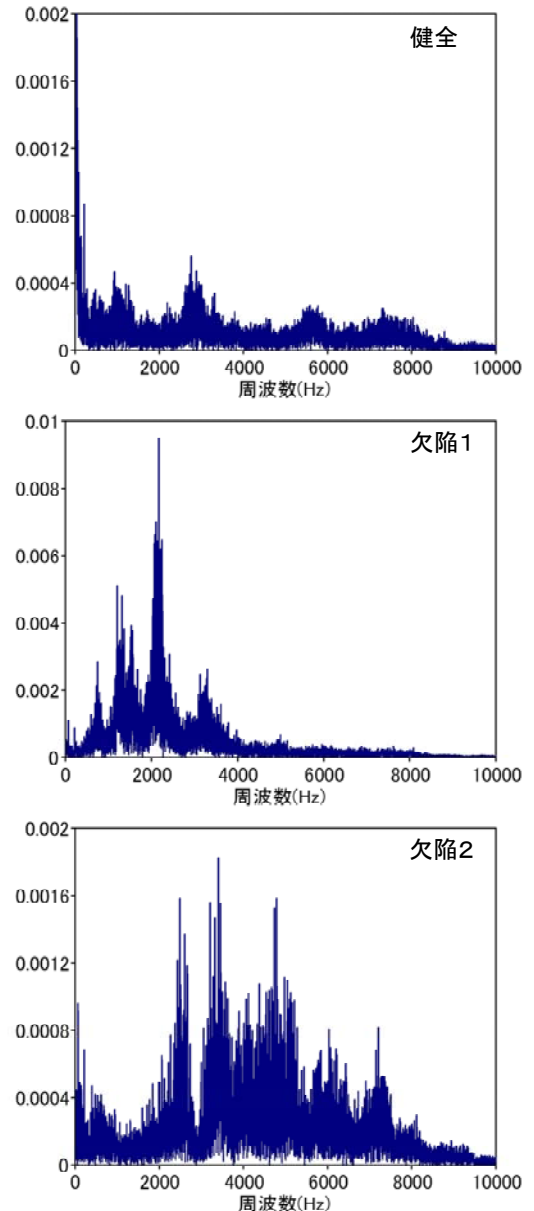


図-3 欠陥と健全のスペクトル

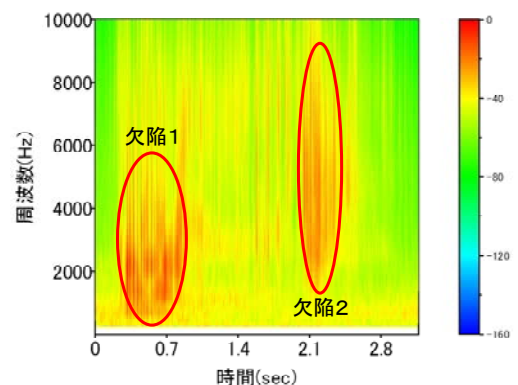


図-4 時間一周波数のスペクトル