

# レーザー超音波法を用いたコンクリート内部欠陥診断システムの開発

構造物技術研究部 基礎・土構造  
副主任研究員 篠田 昌弘

## 1. はじめに

鉄道では、トンネル覆工表面からのコンクリート片の剥落事故を未然に防ぐため、定期的な検査を実施しているが、トンネル固有の諸条件により他の構造物と比較し、検査技術者の負担は著しく大きいものとなっている。また、打音法が主たる検査法となっているため、その診断結果は技術者の主観、センス、問題意識に左右されることとなる。

こうした実情に鑑み、(財)レーザー技術総合研究所(以下、レーザー総研)、国立大学法人東京工業大学、西日本旅客鉄道(株)(以下、JR西日本)および(財)鉄道総合技術研究所(以下、鉄道総研)の4機関は、打音法に代わる検査法として「レーザー超音波法を利用したコンクリート欠陥検出システム」を開発した。本システムの開発は、下記に示す研究課題に対して個々に実施した。

## 2. レーザー超音波法を用いたコンクリート内部欠陥診断システムの開発

### 2.1 レーザー超音波法の探傷性能の向上とプロトタイプの開発

レーザー超音波探傷装置の構成を図1に示す。加振用レーザーは、高出力のパルスレーザーを用い、振動励起の原理には、試料表面がプラズマ化する程度に高い光強度に集光しアブレーションを起こし、その反動により振動を励起させることである。受信用レーザーは、連続発振のレーザーでビームスプリッターにより、信号光と参照光に分けられる。信号光は供試体の表面で反射され供試体表面形状の情報を持ってダイナミックホログラムに戻ってくる。信号光と参照光がダイナミックホログラム結晶中で干渉し合い、結晶中に供試体表面形状の情報が含まれた干渉縞が形成される。この干渉縞により、ダイナミックホログラム内部に屈折率の粗密領域が生成され、参照光を回折させる。参照光は、信号光と同じ光軸を進み検出器に向かう。コンクリート表面が振動すると検出器に入射する信号光と参照光との位相差が変化する。この変化は検出器では光の強弱となってあらわれるため、これを検出することによりコンクリートの振動を検出する。図1に示す原理に基づいてレーザー超音波探傷装置のプロトタイプを開発した。なお、本装置は移動用として開発したので軽トラックの荷台に載せることができる(図2)。提案システムは、コンクリートの内部欠陥の非接触探傷と遠隔探傷を可能としている。図2で示す緑色の光は、受信用レーザー光である。

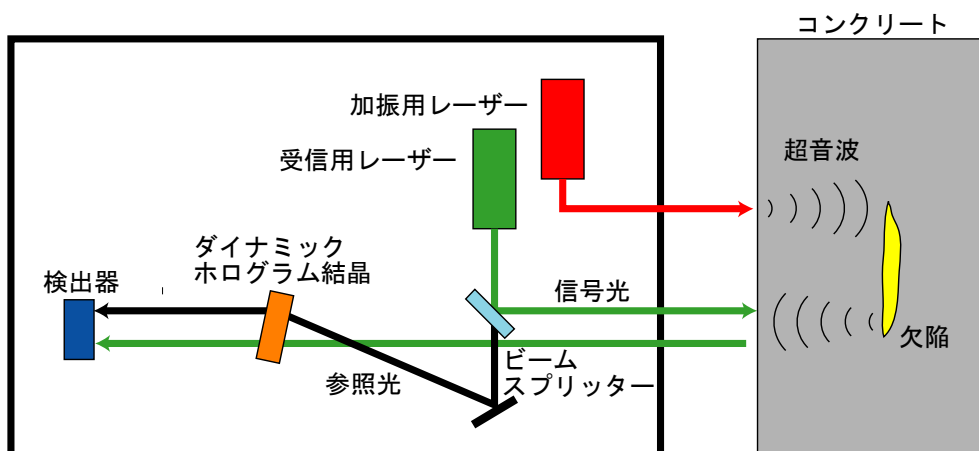


図1 レーザー超音波探傷装置の構成



図2 レーザー超音波探傷システムのプロトタイプ

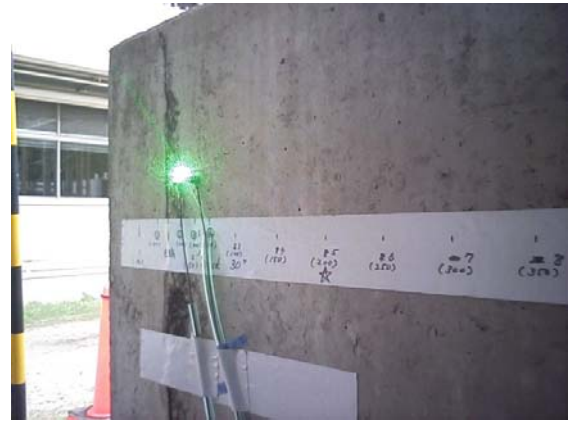


図3 コンクリート欠陥供試体へのレーザーの照射状況

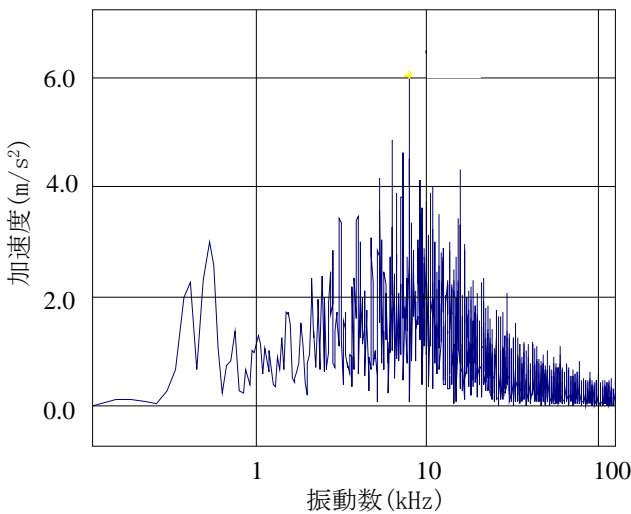


図4 健全な供試体におけるフーリエ振幅スペクトル

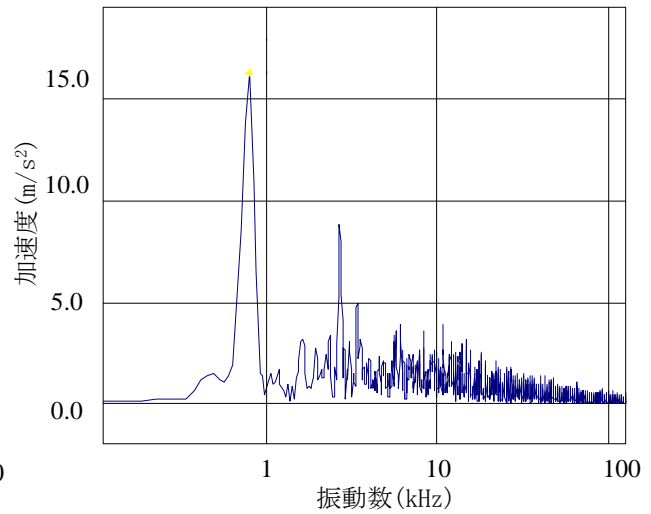


図5 不健全な供試体におけるフーリエ振幅スペクトル

## 2.2 コンクリート欠陥供試体を用いた性能確認試験

コンクリート欠陥供試体を用いて開発した診断システムの性能確認試験を実施した。図3にコンクリート欠陥供試体へのレーザーの照射状況を示す。

代表的な試験結果を図4と図5に示す。健全な供試体を用いた結果では、フーリエ振幅スペクトル上で相対的に高い振動数成分が卓越するが、不健全な供試体を用いた結果では、フーリエ振幅スペクトル上で相対的に低い振動数成分が卓越する結果となった。他の実験結果も同様な結果が得られたことから、コンクリートの内部欠陥はコンクリートの固有振動数で評価できることが分かった。

## 2.3 欠陥検出アルゴリズムの開発

本研究開発では、欠陥検出のためのパラメータとして、打撃によって発生するコンクリート表面の振動に着目した。従来の打音法では、打撃によって発生する打音を聴覚によって適切に聞き分けている。そこで、欠陥検出アルゴリズムの構築の事前検討として打音および表面振動の両者の比較を行い、その結果に基づきアルゴリズムの検討を行った。

検討にあたっては、先に述べた各種の欠陥を模擬した供試体群に対する検証実験を実施するとともに、変状が確認されている実構造に対しても検証実験を行った。

以下に、変状が確認されているボックスカルバートの健全部と不健全部を対象に実施した結果を示す。



図6 検査対象となるボックスカルバート

検査対象となるボックスカルバートを図6に示す。さらに、健全箇所と不健全箇所のコンクリート表面加振試験状況を図7と図8に示す。なお、コンクリート表面の振動は、表面に貼り付けた加速度計で計測した。

図8は健全部および不健全部のコンクリート表面振動波形のフーリエ振幅スペクトルである。コンクリート欠陥供試体をレーザー超音波を用いて加振し、振動波形を分析した結果(図4と図5)と同じ傾向を示しており、健全部では高い振動数が卓越し、不健全部では低い振動数が卓越した。

コンクリート欠陥供試体の模型試験結果と現地計測結果を基に、欠陥検出アルゴリズムを構築した。図10と図11に健全部と不健全部のフーリエスペクトルの代表的な形状を示す。欠陥を判定する指標としては、式(1)に示すように、図10と図11に示すフーリエスペクトルの縦軸である加速度と横軸の振動数との間に挟まれる全周波数域の面積  $A_1+A_2$  に対して、ある閾値より低周波数域の面積  $A_1$  の割合とした。

$$R_{LF} = \frac{A_1}{A_1 + A_2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $R_{LF}$ をスペクトルスコアと呼ぶ。スペクトルスコアが大きいほど不健全であり、スペクトルスコアが小さくなるほど健全と判定される。ここで、 $A_1$ と $A_2$ を分ける閾値としては、コンクリート欠陥供試体の模型試験結果と現地計測結果から2000Hzとした。なお、この値は今後のデータの蓄積により変更される可能性がある。

図11に提案したスペクトルスコアを用いた評価結果を示す。コンクリート内部の欠陥は、ボックスカルバートや土留め壁のコンクリート表面に対して実施された目視や打音検査で得られた代表的な結果を用いた。図11



図7 不健全部のコンクリート表面加振試験状況

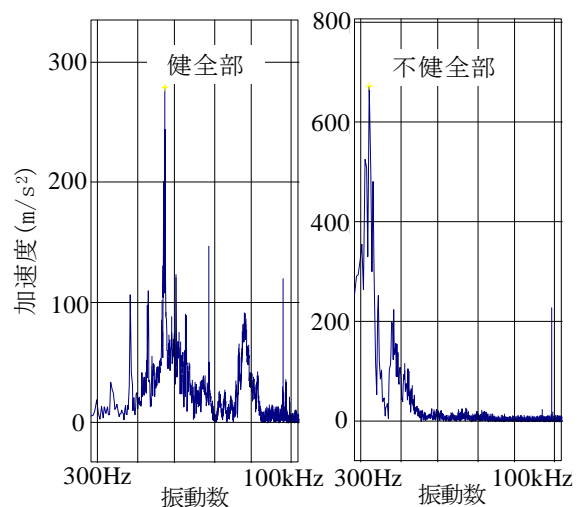


図8 健全部と不健全部のコンクリート表面振動波形のフーリエ振幅スペクトル

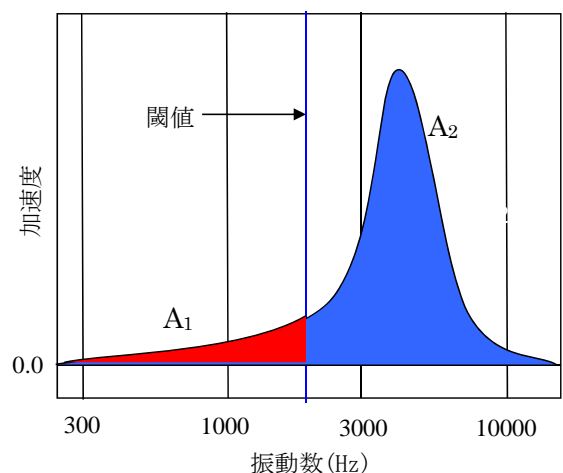


図9 健全部のフーリエスペクトルの代表的な形状 (イメージ)

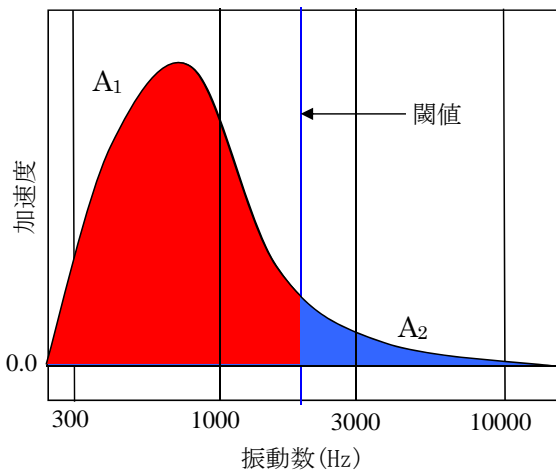


図10 不健全部のフーリエスペクトルの代表的な形状 (イメージ)

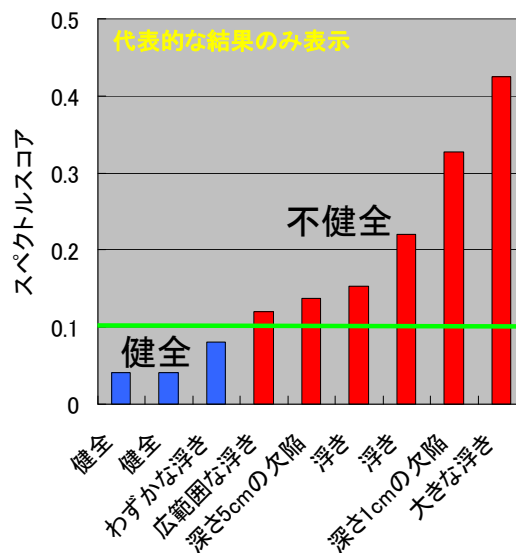


図11 スペクトルスコアによる評価結果

から、スペクトルスコアを用いることにより、コンクリート表面の変状を的確に評価できることが分かる。さらに、健全と不健全の判定として、スペクトルスコアが0.1より小さければ健全、0.1より大きければ不健全となることが分かった。

#### 2.4 実構造物への適用

レーザー超音波欠陥探傷システムに上記の欠陥検出アルゴリズムを組み込み、新幹線橋梁に対してコンクリート内部欠陥探傷試験を実施した。この試験では、事前に打音検査やコンクリート表面加振試験により不健全箇所を特定し、振動特性を把握した後、提案システムによる結果と比較した。比較した結果、提案システムは実測した結果とよく一致し、コンクリート内部の探傷が可能であることが分かった。

#### 3. おわりに

コンクリート表面からの欠陥コンクリートの剥落発生は、一歩間違えれば大事故につながる。そのため、鉄道事業者においては定期的にコンクリート表面の打音検査および入念な目視検査を実施し、事故の発生を未然に防いできている。しかし、検査に携わる検査技術者への負担は、他の構造物検査と比べ著しく大きく、そのため検査手法の改善が急務とされてきた。こうした背景にあつて、筆者らが開発を進めているレーザー超音波探傷システムは、コンクリート表面の検査業務の負担軽減に大いに役立つものと考えている。今後、システムの高出力化および高精度化を図り、今年度末までには実用性の高いシステムとして完成させる予定である。

最後に、今回紹介した一連の研究は、独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構による公募型テーマ「運輸分野における基礎的研究推進制度研究課題」の中で行ったものである。

(参考文献)

- 1) 島田義則：レーザー超音波リモートセンシング技術の産業応用，検査技術，Vol.11, No.9, pp.8-14, 2006.



図12 新幹線橋梁における現地試験