

# レーザー加振によるコンクリート部材の 非破壊検査法の開発

篠田 昌弘\* 大村 寛和\* 御崎 哲一\*\*  
島田 義則\*\*\* 内田 成明#

## Development of Non-destructive Inspection Method for Concrete Material with Laser-induced Vibration

Masahiro SHINODA Hirokazu OOMURA Norikazu MISAKI  
Yoshinori SHIMADA Shigeaki UCHIDA

A periodic inspection is conducted to prevent an accident of fall of a concrete material from concrete facing of tunnel. One major method for such inspection is an impact acoustics method which is popular because both the inspection and treatment can be conducted simultaneously. However, it is difficult to evaluate concrete performance quantitatively by the impact acoustics method because of its dependence on engineer's subjectivity and skill. Therefore, an inspection method by laser technique to evaluate concrete performance has been developed. By the proposed method, the concrete performance can be evaluated in good agreement with the result of the impact acoustics method.

キーワード：レーザー加振，非破壊検査法，コンクリート部材，欠陥検出アルゴリズム

### 1. はじめに

鉄道では、コンクリート構造物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<sup>1)</sup>。検査対象となるコンクリート表面が地上から高い位置にある場合、高所作業車の使用など検査労力や検査時間が必要となる。特に、延長距離の長いトンネルは、検査対象となるコンクリート表面が地上より高い箇所であり、且つ、検査箇所が膨大になるため、検査技術者の負担は著しく大きいものとなっている。既存の主な検査手法の長所と短所を表1にまとめた。表1には、打音法、赤外線検出法、超音波法に関してまとめているが、いずれも一長一短があり、高い精度で迅速に検査を実施できる手法ではない。

表1に示す検査手法の中で実務で最も重要視されるのが、検査精度と検査時間である。最も使用実績のある打音法は、検査技術者の主観、技量などに左右され、一定の検査精度を確保することが難しい。また、赤外線検出法は打音法を適用する前のスクリーニング手法として注目されている。赤外線検出法は、非接触・遠隔探傷が長所として挙げられる。トンネル内に赤外線検出法を適用

する場合には、熱を強制的に与えるアクティブ赤外線法があるが、トンネル覆工全体を検査する場合には、機材が大がかりになることや、高精度の計測が難しいといった欠点がある。超音波法は、装置が小型で高い計測精度を有しているが、曲面での検査が難しい。

こうした実情に鑑み、(財)レーザー技術総合研究所、国立大学法人東京工業大学、西日本旅客鉄道(株)および(財)鉄道総合技術研究所の4機関は、打音法適用前のスクリーニング手法として、レーザーリモートセンシングシステムによるコンクリート部材の非破壊検査法を開発した。本報告では、提案システムの原理と検査精度を向上させるための欠陥検出アルゴリズム、提案システムの適用性について述べる。

### 2. レーザーリモートセンシングシステムの開発

#### 2.1 レーザーリモートセンシングシステムの原理

提案するレーザーリモートセンシングシステムの基本構成を図1に示す<sup>2)</sup>。提案システムは、加振用と計測用に異なるレーザーを用いている。これは、加振用レーザーでは、コンクリート表面を加振する必要があるため、高出力のパルスレーザーである必要があるためである。一方、計測用レーザーでは、後述するようにコンクリート表面および内部欠陥の程度とコンクリート表面の振動特性に相関があることから、コンクリート表面の振

\* 構造物技術研究部(基礎・土構造)  
\*\* 西日本旅客鉄道  
\*\*\* 財団法人 レーザー技術総合研究所  
# 国立大学法人 東京工業大学

特集：構造物技術

表1 コンクリート部材の主要な非破壊検査法と提案手法の比較

	提案法	既存検査法		
	レーザー法	打音法	赤外線検出法	超音波法
検査の様子				
長所	<ul style="list-style-type: none"> <li>・非接触・遠隔探傷</li> <li>・高速探傷</li> <li>・高い計測精度</li> <li>・曲面の計測可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・多数の実績</li> <li>・簡易</li> <li>・その場でたたき落とし可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・非接触・遠隔探傷</li> <li>・欠陥形状を把握可能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・小型装置</li> <li>・高い計測精度</li> </ul>
短所	<ul style="list-style-type: none"> <li>・外乱による検出効率低下</li> <li>・大型装置</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・人工と検査時間がかかる</li> <li>・高所作業</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・検査精度が悪い</li> <li>・コンクリート表面を熱する必要がある</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・検査時間がかかる</li> <li>・曲面での計測が困難</li> <li>・高所作業</li> </ul>

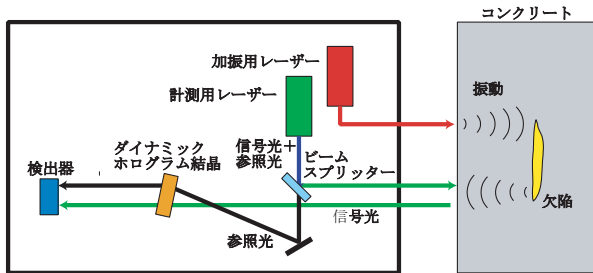


図1 レーザーリモートセンシングの基本構成

動を計測する必要があり、連続発振のレーザーである必要があるためである。加振用レーザーによる振動励起の原理は、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、その際に生じるガスの衝撃により振動を励起させる。計測用レーザーには、高出力のYAGレーザーを用いており、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。信号光はコンクリートの表面で反射されコンクリート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、結晶中にコンクリート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らわられるため、これを検出することによりコンクリート表面の振動を検出する。

表1に示すように、提案システムは、装置が大型になる等の欠点はあるものの、コンクリートの表面および内部欠陥の非接触探傷と遠隔探傷を可能としていることか



図2 レーザーリモートセンシングシステムの試作機

ら、作業効率が大幅に向上している。さらにコンクリート表面の微振動を精密に計測することから、コンクリート部材の非破壊検査法として定量的な評価が可能となる。

2.2 レーザーリモートセンシングシステムの試作機の開発

図1に示す機構を搭載したレーザーリモートセンシングシステムの試作機を開発した。図2に提案システムの試作機を示す。開発にあたって、検査装置の移動の観点から、図2に示すように軽トラックの荷台に積み込めるようにした。なお、この試作機には、コンクリート表面の微振動を高精度に計測するために必要な干渉縞安定化装置を搭載している。干渉縞安定化装置は、検出器とコンクリート表面が微振動することで発生する干渉縞のゆらぎを低下させる装置である。この干渉縞安定化装置については、文献3)を参照されたい。なお、この干渉縞安定化装置は、微振動を低下させる装置であるため、保守用車等の大きな振動は除振することができない。

### 2.3 コンクリート供試体を用いた性能確認試験

図2に示すレーザーリモートセンシングシステムの試作機を用いて、図3に示すコンクリート大型供試体へ5m遠方からレーザーを照射し、システムの性能確認試験を実施した。コンクリート供試体は、高さ約1.0 m、幅5.8 m、厚さ0.5 mである。このコンクリート供試体は、浮き、クラック、内部空洞などの様々な不健全性を模擬している。



図3 欠陥を模擬した大型コンクリート供試体

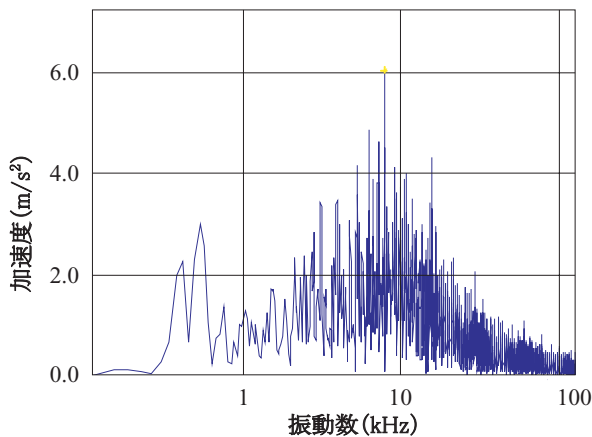


図4 健全な供試体で計測されたフーリエ振幅スペクトル (大型コンクリート供試体)

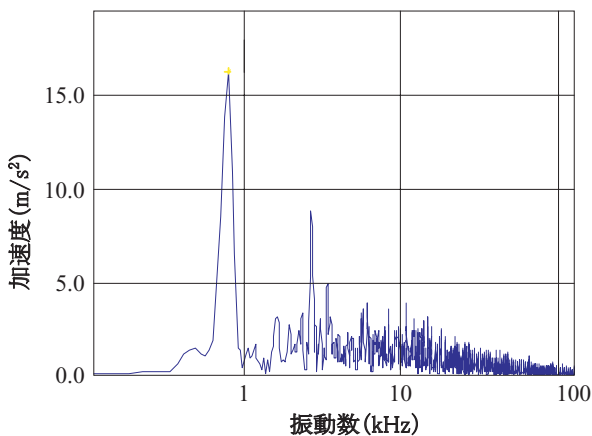


図5 不健全供試体で計測されたフーリエ振幅スペクトル (大型コンクリート供試体)

ている。

代表的な試験結果として、図4と図5に健全なコンクリート供試体の加速度の時刻歴データから得られたフーリエ振幅スペクトルとコンクリート表面から深さ10cmの内部空洞を模擬した不健全なコンクリート供試体のフーリエ振幅スペクトルを示す。検査箇所は図3に示すとおりである。健全な供試体を用いた場合には、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。上記実験結果は、後述する打音法によるコンクリート表面加振試験結果と比較することにより妥当性を確認している。以上のことから、コンクリート表面および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。また、5m遠方からのコンクリート探傷が可能であることも確認した。

### 3. 欠陥検出アルゴリズムの開発

前述したように、打音法による診断結果は技術者の主観、技量に左右される。したがって、計測データから一定の基準で健全度を診断できる定量評価手法の開発が必須となる。そのためには、コンクリート表面の特徴を表す加速度時刻歴のデータベースを構築することが重要であり、さらに、そのデータベースを用いた欠陥検出アルゴリズムの開発が必要となる。以下に、コンクリート表面および内部欠陥の健全部位と不健全部位の特徴を表すデータベースの構築方法と、欠陥検出アルゴリズムについて述べる。

#### 3.1 データベースの構築

欠陥検出アルゴリズム開発の核となるデータベースの構築には、従来から実施されてきた打音法による診断結果と併せてデータを収集する必要がある。打音法は、検査技術者の耳で直接聞くことにより診断されることから、音波が重要であると考えられる。しかしながら、この音波の計測は騒音などの外乱に大きく左右され、実務計測で大きな問題となることが予想される。したがって、音波による計測結果と整合する他の計測結果が必要となる。本研究では、音波による計測結果と整合する計測方法として、ハンマー打撃によるコンクリート表面の加速度に着目した<sup>4)</sup>。事前検討から、ハンマー打撃による音波のフーリエ振幅スペクトルとコンクリート表面の加速度のフーリエ振幅スペクトルを比較し、フーリエスペクトルの形状とそのピークが両者ではば一致することを確認した<sup>5)</sup>。本報告では、実コンクリート構造物に対して実施したハンマー打撃によるコンクリート表面加速度のフーリエ振幅スペクトル結果を示す。データベース

特集：構造物技術

構築のために図3に示すコンクリート模型供試体やボックスカルバート、土留め壁、トンネルなどの実コンクリート構造物に対してハンマー打撃によるコンクリート表面の加速度波形を多数収録した。収集した加速度波形の総数は85である。試験対象構造物の一例として、ボックスカルバートを図6に示す。調査対象箇所は、打音と目視で確認した健全箇所と浮きが生じた不健全箇所である。



図6 試験対象のボックスカルバート

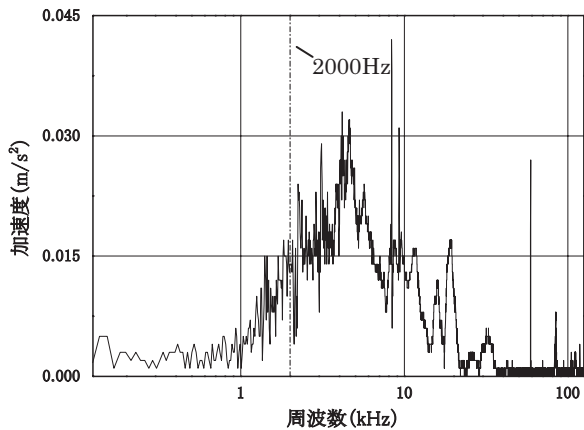


図7 健全箇所で計測されたフーリエ振幅スペクトル (ボックスカルバート)

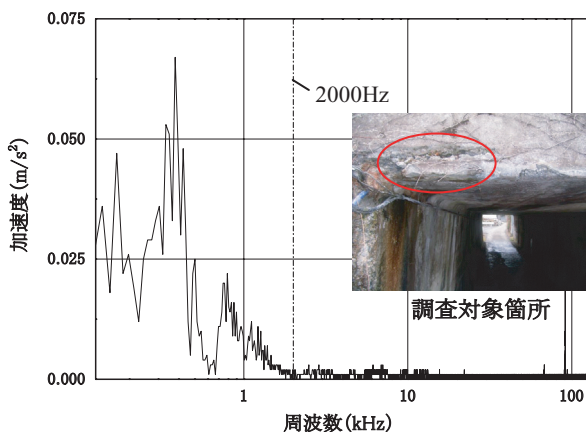


図8 不健全箇所で計測されたフーリエ振幅スペクトル (ボックスカルバート)

る。加速度センサは、接着剤でコンクリート表面に接着した。図7と図8に健全箇所と不健全箇所のコンクリート表面加速度のフーリエ振幅スペクトルを示す。また、図8には、不健全箇所の写真を同時に示した。図7と図8から健全箇所は高い振動数帯域が卓越するのに対して、不健全箇所は低い振動数帯域が卓越することが分かる。この結果はコンクリート模型供試体や他の実構造物から得られた結果と一致することを確認している。以上のことから、コンクリート表面の振動を計測し、フーリエ振幅スペクトルを算出することで健全度を評価できることが分かる。

3.2 欠陥検出アルゴリズムの開発

前述したように、コンクリート表面の健全性は、コンクリート表面の加速度のフーリエ振幅スペクトルで評価できることから、以下のような欠陥検出アルゴリズムを開発した。図9と図10に健全箇所と不健全箇所のフーリエ振幅スペクトルのイメージ図を示す。コンクリート表面の健全度診断は、フーリエ振幅スペクトル上で、ある閾値を境にした面積比で評価する。すなわち、式(1)に示すような指標を提案する。

$$R_s = A_1 / (A_1 + A_2) \quad (1)$$

ここで、 $A_1$ はコンクリート表面の加速度波形から算出さ

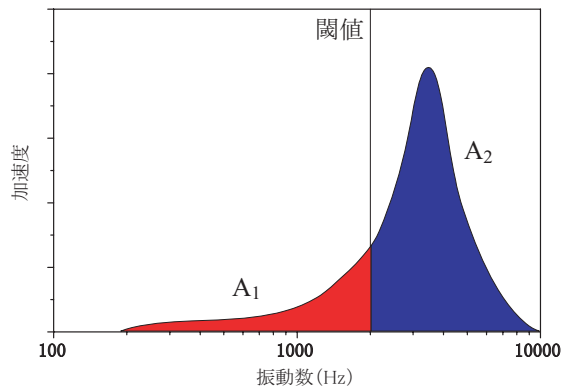


図9 健全箇所のフーリエ振幅スペクトルのイメージ

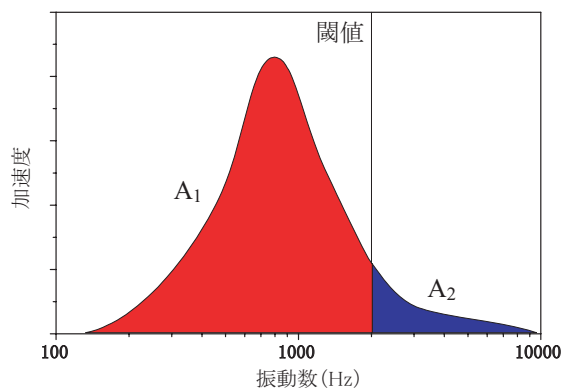


図10 不健全箇所のフーリエ振幅スペクトルのイメージ

れたフーリエ振幅スペクトルのうち、ある閾値より低い振動数成分におけるフーリエ振幅スペクトルの面積、 $A_2$ はコンクリート表面の加速度波形から算出されたフーリエ振幅スペクトルのうち、ある閾値より高い振動数成分

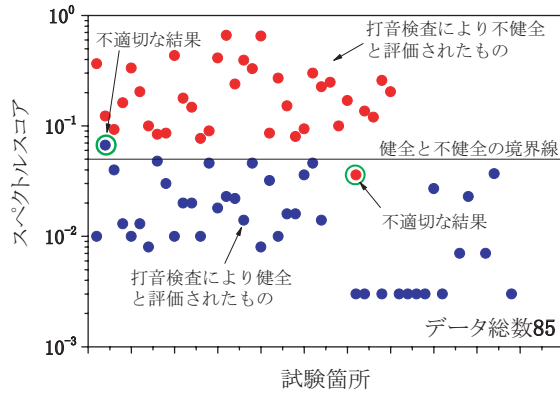


図 11 閾値 1500Hz でのスペクトルスコア

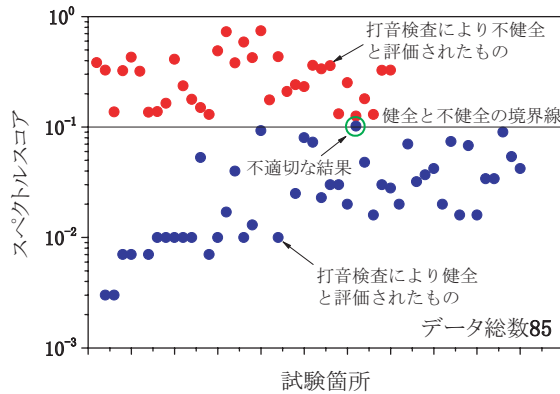


図 12 閾値 2000Hz でのスペクトルスコア



図 13 検証試験で実施した新幹線橋梁



図 14 不健全箇所でのコンクリート表面加振試験の様子

におけるフーリエ振幅スペクトルの面積、 $R_3$ はフーリエ振幅スペクトルの面積比であり、本報告ではスペクトルスコアと呼ぶこととする。データベースを用いた事前検討から、不健全であればあるほどフーリエ振幅スペクトルのピーク時の振動数は下がり、健全であればあるほどフーリエ振幅スペクトルのピーク時の振動数は上がることを把握していることから、スペクトルスコアを用いることで、コンクリート部材の健全度を適切に評価できると考えられる。

実際の適用にあたっては、図9や図10に示す閾値の設定が重要となる。そこで、閾値の感度解析を実施し、打音検査結果と整合する閾値を検討した。図11と図12に打音検査結果とコンクリート表面加振試験結果から、閾値を1500Hzと2000Hzとした場合の各試験箇所のスペクトルスコアを示す。図11から、閾値を1500Hzとした場合には、スペクトルスコアが0.05を境に健全度を区別することは可能であるが、用いたデータベースのうち2つのデータが不適切な結果となった。また、閾値を2000Hzとした場合には、スペクトルスコア0.1を境に健全度を区別することが可能であり、用いたデータベースのうち、1つのデータが不適切な結果となった。閾値を様々な値に変化させて同様な検討を行った結果、適切な閾値は2000Hzであり、打音検査から得られた結果と整合することが分かった。参考として、図7と図8に閾値である2000Hzを記載した。図7と図8から健全であれば、フーリエスペクトルのピークが2000Hzより高く、不健全であれば、フーリエスペクトルのピークが2000Hzより低いことが分かる。本検討は収集したデータベースを用いて閾値を設定したが、さらにデータを増やすことによって、検査精度が向上する可能性があるため、閾値の設定については今後さらに検討する必要がある。なお、図11や図12に用いたデータは、欠陥の種類によって分類はしていない。

#### 4. 実構造物での検証実験

提案するレーザーリモートセンシングシステムに開発した欠陥検出アルゴリズムを搭載し、新幹線橋梁に対してコンクリート表面欠陥探傷試験を実施した。図13に検証試験で実施した新幹線橋梁を示す。この橋梁は、支間7.0 mのRC桁を高さ7.5 mの杭基礎橋台で支持している。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を行い不健全箇所を特定し、振動成分を把握した後、提案システムによる結果と比較した。不健全箇所のコンクリート表面加振試験の様子を図14に、不健全箇所へのレーザー照射の様子を図15に示す。

提案システムの検証のために、コンクリート表面加振試験と提案システムによる計測から得られたフーリエ振幅スペクトルを比較した(図16)。図16からコンクリー

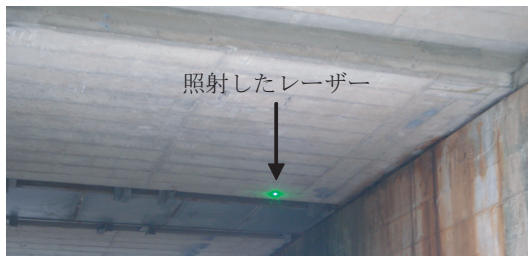


図 15 不健全箇所のレーザー照射の様子

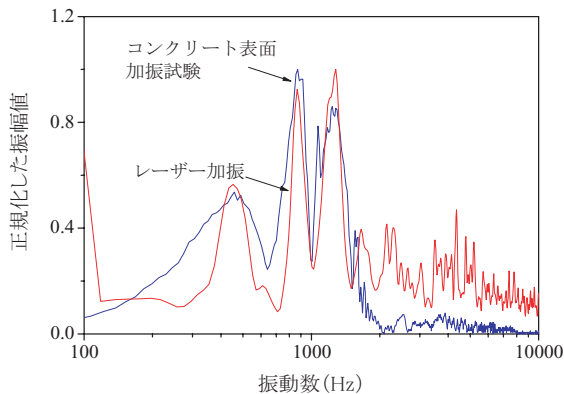


図 16 不健全箇所のフーリエ振幅スペクトル

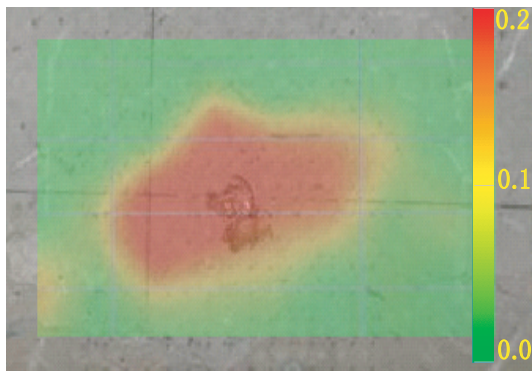


図 17 提案法によるスペクトルスコアのコンター図

ト表面加振試験から得られたフーリエ振幅スペクトルの形状と提案システムから得られたフーリエ振幅スペクトルの形状はほぼ等しい結果となった。また、コンクリート表面加振試験から得られたピーク時の振動数(870Hz)は、レーザー加振でもほぼ等しい値(866Hz)で把握することが可能であることが分かった。さらに、図16で得られたような多数のフーリエ振幅スペクトルから、スペクトルスコアを算定した結果を図17に示す。図17は、レーザーを連続照射し、リアルタイムに欠陥検出アルゴリズムによってコンクリート部材の健全度を評価した結果である。以上のことから、提案システムによりコンクリート部材の健全度が評価できることが分かる。なお、本検証試験は外乱が少ない理想的な条件の下で実施されたものである。実際には様々な外乱が作用するおそれがあるため、実用化のためには、今後継続して研究開発を実施していく必要がある。

## 5. 結論

本研究では打音法を適用する前のスクリーニング手法としてレーザーリモートセンシングシステムによるコンクリート部材の非破壊検査法を開発した。これより以下の成果が得られた。

- ① レーザー加振を用いたコンクリート部材の非破壊検査システムのプロトタイプを開発した。
- ② コンクリート模型を用いて、提案システムの性能を確認した結果、コンクリートの表面および内部欠陥を検出できることが分かった。
- ③ 実構造物のコンクリート表面加振試験を実施し、多数の振動波形を収録し、欠陥検出アルゴリズムを構築した。
- ④ 欠陥検出アルゴリズムを組み込んだ測定結果処理プログラムを開発し、実構造物に対して提案システムを適用した結果、コンクリートの表面および内部欠陥を検出できることが分かった。

今回開発したレーザー加振によるコンクリート部材の非破壊検査法は、基礎技術は確立したものの、実用化にあたっては、下記の検討課題があり、今後継続して研究開発を実施する必要がある。

- ① 常時微動などの微振動は干渉縮安定化装置によって影響を取り除くことが可能だが、常時微動より大きな振動の影響が大きいため、振動を抑制する機構が必要である。
- ② 計測精度向上のために、レーザー信号強度の更なる向上が必要である。
- ③ 計測速度向上のために、レーザーの照射速度と照射間隔を設定する必要がある。

なお、本研究は、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。

## 文献

- 1) 国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編），丸善，2007
- 2) 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
- 3) 島田義則，オレグコチャエフ，内田成明，羽矢洋，中川晋一：レーザー超音波リモートセンシング装置を用いたコンクリート内部欠陥探傷—(1) 振動安定化装置を用いた検出シグナル/ノイズ比の向上—，第63回土木学会年次学術講演会，pp.111-112, 2008
- 4) 大村寛和，羽矢洋，島田義則，内田成明，中川晋一：レーザー超音波リモートセンシング装置を用いたコンクリート内部欠陥探傷—(2)ハンマー打撃によって発生する実構造物の表面振動・打音解析結果と欠陥検出アルゴリズム—，第63回土木学会年次学術講演会，pp.116-117, 2008
- 5) 大村寛和，篠田昌弘，島田義則：コンクリート内部欠陥自動診断システムの開発に向けた基礎的研究—(1)—，第43回地盤工学研究発表会，pp. 1451-1452, 2008