

ハンマーを用いずに新幹線トンネル覆工コンクリートを打音検査

御 崎 哲 一・篠 田 昌 弘・島 田 義 則

我が国に建設された土木構造物は、高度経済成長期に建設されたものが多く、今後ますます老朽化が進行することが想定される。平成11年に発生した山陽新幹線福岡トンネル及び北九州トンネルのコンクリート塊剥落事故は、コンクリート構造物の検査の重要性を再認識させた事故の一つである。トンネル覆工の検査では打音検査が一般に実施されているが、人手がかかる上に検査者の技量に左右される課題がある。本報では、打音検査を実施する前のスクリーニング手法の一つとして、数m以上離れた箇所から検査できるレーザーによる非接触計測技術を用いたコンクリート剥離検査装置を開発したので報告する。

キーワード：トンネル、覆工、打音検査、レーザー

1. 開発の背景

現在の社会の礎を築いているコンクリート構造物において、コンクリートの劣化による剥落事故が発生している。特に平成11年、山陽新幹線福岡トンネル（写真—1）及び北九州トンネル（写真—2）において発生したコンクリート塊剥落事故は、コンクリート構造物の検査の重要性を再認識させた。

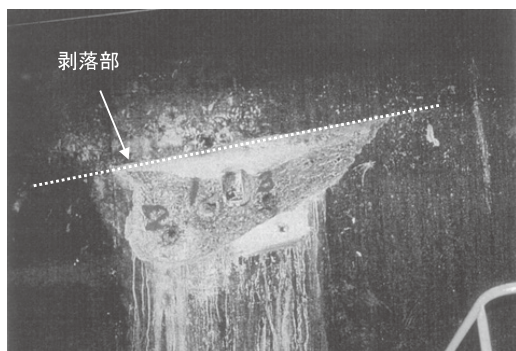
現在の主たる検査手法である打音法は、検査対象となるコンクリート表面までの距離が手の届かない位置にある場合、高所作業車を使用し接近しなければならない。特にトンネルは、検査対象となるコンクリート表面が地上より高い箇所であり、かつ検査箇所数が膨大になるため、検査技術者の負担は著しく大きく、多大な検査時間を要する。また、鉄道トンネル覆工検査の制約として、鉄道運行時間帯に検査ができないこと、線路走行可能な高所作業車を現地まで運行し手配

しなければならないこと、また鉄道運行用電力の停電措置を講じるといった時間が無視できないことが挙げられる。こうした実情に鑑み、高所作業や停電作業を削減しながら、コンクリートが剥落する前に変状箇所を把握することを目的に、数m以上離れた箇所から検査できる、レーザーによる非接触計測技術（以下、「本技術」という）を用いたコンクリート剥離検査装置（以下、「本装置」という）を開発した。

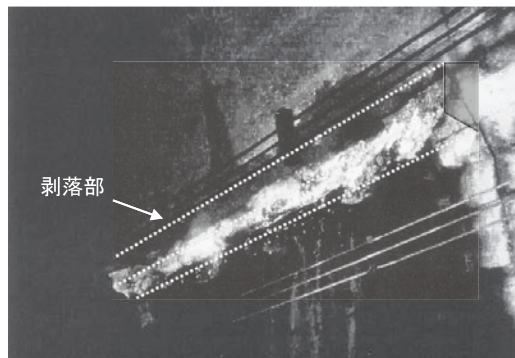
2. 技術の概要

(1) トンネル覆工コンクリートの剥離検知技術における過去の検討

コンクリート表面の浮きや欠陥を検査する手法としては、前章で述べた打音法の他に、電磁波レーダー法、弾性波探傷法、赤外線検出法等があり、その長所短所を表—1にまとめた。いずれも、コンクリート剥離



写真—1 福岡トンネルコンクリート塊剥落事故部



写真—2 北九州トンネルコンクリート塊剥落事故部

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

	電磁波レーダー法	打音法	赤外線検出法	超音波法
検査の様子				
長所	・覆工背面の欠陥・空洞を探索可能 ・走行しながら検査可能	・簡易 ・その場でたたき落とし可能	・欠陥形状を把握可能 ・非接触・遠隔探傷	・小型装置 ・高い計測精度
短所	・コンクリート表面の剥離を検知するのが困難 ・大型の装置でコンクリートにほぼ接触させた状態で計測	・人工と検査時間がかかる ・高所作業	・検査精度が悪い ・コンクリート表面を熱する必要がある	・検査時間がかかる ・曲面での計測が困難 ・高所作業

を打音法と同等の精度で、かつ非接触で迅速に検査できる手法はない。

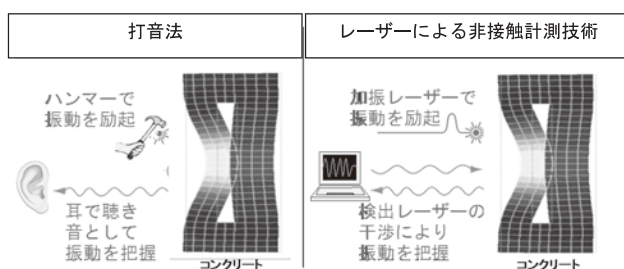
(2) レーザーによる非接触計測技術の原理

打音法と本技術は、コンクリート表面を加振し、表面振動を把握するという点で、欠陥検知の考え方は同一（図—1）である。そのため本技術を用いると、打音を実施する前のスクリーニング手法として適用できる。

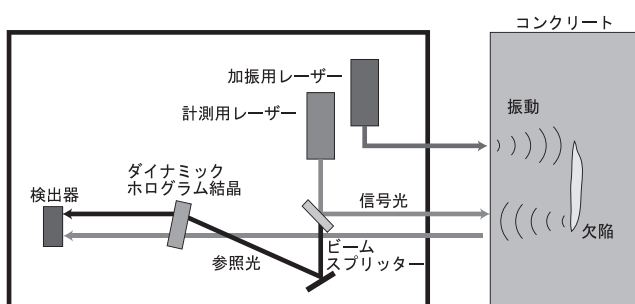
本技術手法の構成を図—2に示す。コンクリート表面加振のための加振用レーザーには、高出力のパル

スレーザーを用いる。そのレーザーを検査するコンクリート表面に高い光強度で集光することにより、コンクリート表面成分（セメント等）をプラズマ化する。そのプラズマ粒子が弾き飛ばされる（アブレーションという）反動により、コンクリート表面の振動が励起される。

計測用レーザーには、連続発振のレーザーを用いる。そのレーザーは、ビームスプリッター（分光器）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結晶に入射する。一方で、参照光も同じダイナミックホログラム結晶に入射し、信号光と参照光がその中で干渉し合うことで、コンクリート表面形状の情報が含まれた干渉縞（写真—3）がダイナミックホログラム結晶中に形成される。この干渉縞により、ダイナミック結晶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



図—1 打音法とレーザーによる非接触計測技術手法の比較



図—2 レーザーによる非接触計測技術手法の構成



写真—3 干渉縞

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表面の振動を検出する。

(3) コンクリート剥離箇所の検出アルゴリズム構築

本技術を実用化するためには、健全度の判定が可能な欠陥検出アルゴリズムの構築が必要である。一方で、本技術と打音法は、共にコンクリート表面の加速度波形を計測していることは前項に述べた。鉄道土木構造物におけるコンクリート表面の判定基準には、 α （剥落危険性の高い変状）、 β （当面剥落危険性はないが、将来 α ランクになる恐れのある変状）、 γ （安全を脅かす剥落を生じる恐れがない変状）、健全の4種類がある。打音法における検査者の定性的判断を定量化するため、コンクリート表面の加速度波形を用いたコンクリート部材の欠陥検出アルゴリズムを開発した。

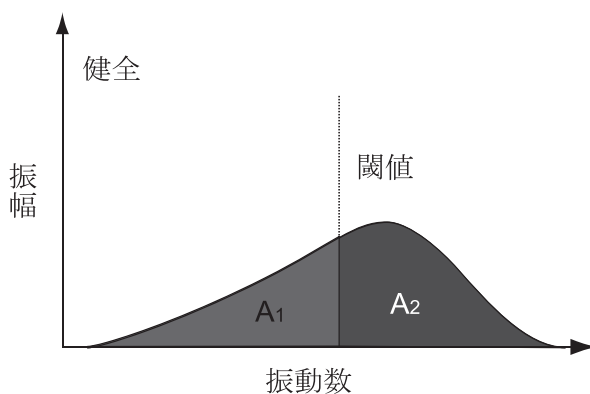
まず、欠陥検出アルゴリズムを開発するために、コンクリート表面の振動特性の把握を行った。実施した現地試験箇所の例を写真—4に示す。打音法による現地試験結果から425箇所のコンクリート表面の振動特性に関するデータベースを作成した。データベースから、健全なコンクリート部材は、図—3に示すように、衝撃荷重を与えた際の残留振動のフーリエ振幅スペクトル上で相対的に高い周波数成分が卓越するが、不健全なコンクリート部材では、図—4に示すように、フーリエ振幅スペクトル上で相対的に低い周波数成分が卓越する傾向があることが判明した。そこで、衝撃荷重を与えた際のコンクリート部材の揺れやすさを評価するために、フーリエ振幅スペクトル上で、ある閾値を境にした面積比を用いた欠陥検出アルゴリズムを提案した。すなわち、式(1)に示すような指標を提案した。

$$R_s = \frac{A_1}{A_1 + A_2} \quad (1)$$

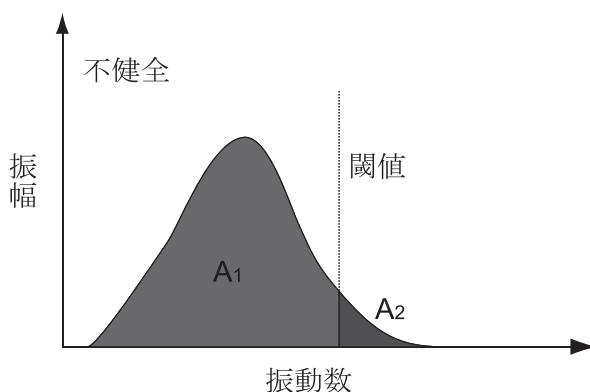
ここで、 A_1 はコンクリート表面の加速度波形から算出されたフーリエ振幅スペクトルのうち、ある閾値より低い周波数成分におけるフーリエ振幅スペクトルの面積、 A_2 はコンクリート表面の加速度波形から算出されたフーリエ振幅スペクトルのうち、ある閾値より高い周波数成分におけるフーリエ振幅スペクトルの面積、 R_s はフーリエ振幅スペクトルの面積比であり、ここでは、スペクトルスコアと呼ぶ。実際の適用にあたっては、図—3や図—4に示す閾値の設定が重要となる。そこで、閾値の感度解析を実施し、打音検査結果と整合する閾値を検討した結果、閾値を2,000 Hzに設定すると合致率が85.2%と高い合致率を示す結果が得られた（図—5）。

(4) 山陽新幹線橋梁における検証試験

本装置に欠陥検出アルゴリズムを搭載し、軽トラックの荷台に積み込んだ状況を写真—5に示す。また、検証試験を実施した山陽新幹線橋梁の様子を写真—6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



図—3 健全箇所のフーリエ振幅スペクトル（イメージ）

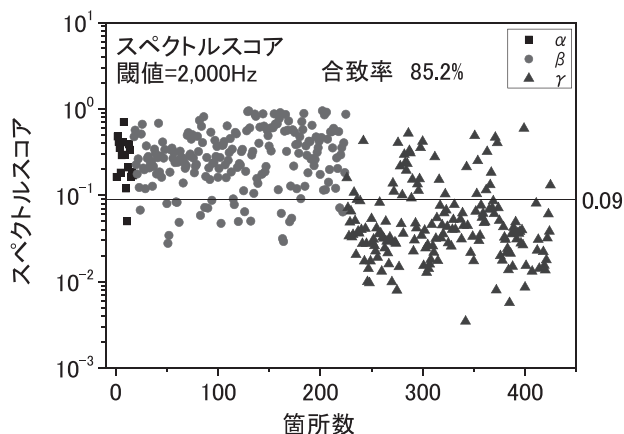


図—4 不健全箇所のフーリエ振幅スペクトル（イメージ）



写真—4 現地試験箇所例

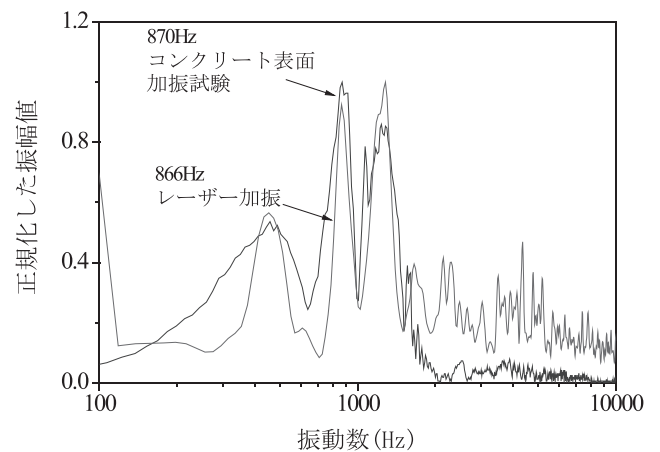
フーリエ振幅スペクトルを比較した結果、コンクリート表面加振試験から得られたスペクトルの形状と本装置から得られたスペクトルの形状はほぼ等しい結果となった（図—6）。さらに、図—6で得られたような多数のフーリエ振幅スペクトルから、スペクトルスコアを算定した結果を図—7に示す。図—7は、レーザーを連続照射し、リアルタイムに欠陥検出アルゴリズムによってコンクリート部材の健全度を評価した結果である。以上のことから、本装置によりコンクリート部材の健全度が評価できることが分かった。



図—5 閾値を 2,000 Hz に設定した時のスペクトルスコア算出結果

(5) 試作機を用いた山陽新幹線トンネル内における検証試験

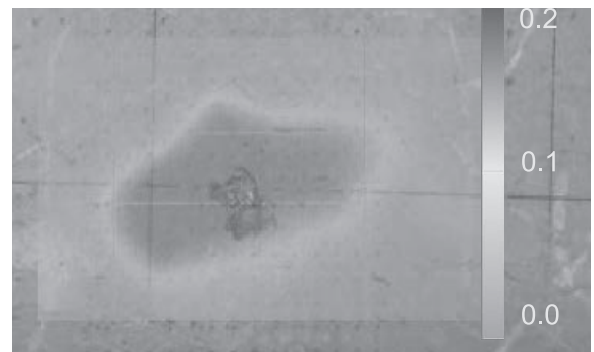
試作機を用いた検証試験は実際の新幹線トンネル内で夜間実施した。検証試験では、写真—5に示した本装置を搭載した軽トラックをトロ上に固定し、保守用車に接続して実施した（写真—7）。新幹線トンネル内で保守用車に接続した状態で検証試験を実施したところ、保守用車や発電機の振動により、振動計測ができなかった。計測ができなかった原因として、保



図—6 コンクリート表面加振試験と本装置の比較結果



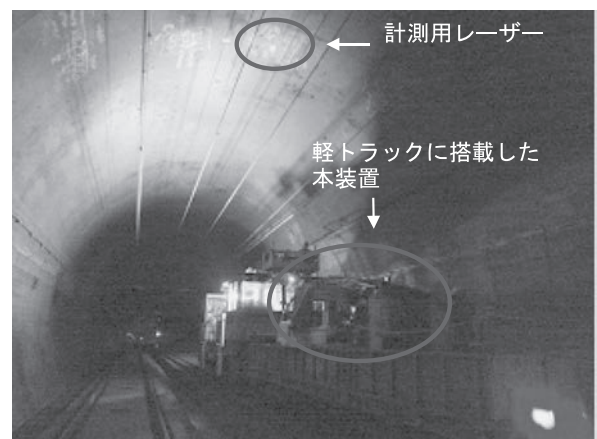
写真—5 コンクリート剥離検査装置の試作機



図—7 リアルタイム診断結果（スペクトルスコアのコンター図）



写真—6 検証試験で実施した新幹線橋梁



写真—7 試作機における新幹線トンネル内における検証試験

守用車や発電機からの環境振動と密閉された空間における環境騒音が想定された。そのため、レーザー加振後のコンクリート表面の微振動を計測するためには、環境振動と環境騒音を低減させる機構が必要なことが分かった。

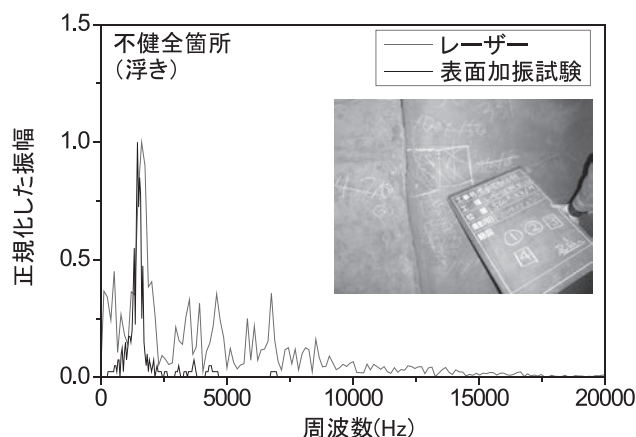
そこで、環境振動を低減させるために除振台を開発し、環境騒音を低減させるために防音対策を実施して、新幹線トンネル内にて再度検証試験を実施した(写真—8)。検証試験結果を図—8に示す。コンクリート表面加振試験から得られたスペクトルの形状と本装置から得られたスペクトルの形状はほぼ等しい結果となった。

(6) 実用機の開発

試作機による新幹線トンネルにおける検証試験の結果、環境振動と環境騒音の低減に成功し、本装置による計測技術を確立した。実際に運用にあたっては、新幹線トンネル中央に設けられた検査用の通路を走行できることが望ましい。そのため、試作機の機能を有し



写真—8 対策した試作機における新幹線トンネル内における試験状況



図—8 対策した試作機における新幹線トンネル内における検証試験結果

た小型機を開発した(写真—9)。本装置を用いて、当面は打音検査前のスクリーニングとして実施し、データが蓄積された後に、打音検査の代替機として検討する予定である。本装置を実用化することにより、これまで多大な労力と時間を要した検査の省力化を図ることが可能となる。

3. おわりに

筆者ら開発グループは、平成11年度に剥落事故があつてから、打音に代替できる非破壊検査手法を調査してきた。平成16年度から本技術の開発に着手し、平成20年度まで、10m程度の離隔からコンクリート剥離を検知するための基礎試験・仕様検討を行った。平成21年度から装置化を実施し、平成23年度まで、新幹線トンネル内で線路走行型の試験装置で実績を積み上げた。平成24年度からは小型化し、トンネル中央通路走行型の実用機(写真—9)として開発した。本装置の効果としては、下記が挙げられる。

- ①高所作業・停電作業が無くせることで、保安要員を削減しながら作業員の安全性を向上させることができる。
- ②作業員による打音検査のばらつきが無くなり、検査の品質・速度を向上させることができる。
- ③本装置は鉄道土木構造物のみならず、全てのコンクリート構造物の健全度診断に活用できる。

今後、土木構造物ストックが老朽化する一方で、維持管理技術者が少子化で不足することが予見される現



写真—9 トンネル内中央通路型の装置

在、汎用的で実績のある打音検査に代替できる本技術レーザーによる非接触計測技術は、今後の維持管理に不可欠で、社会的貢献が大きい技術開発である。外部からの評価としては、レーザー学会業績賞（進歩賞）や土木学会技術開発賞を受賞するなど、安心・安全という社会ニーズに合致した実用化研究であること、現場で利用できる技術であることの実証が評価されている技術である。



〔筆者紹介〕

御崎 哲一（みさき のりかず）
西日本旅客鉄道株式会社 鉄道本部 技術開発部
課長代理



篠田 昌弘（しのだ まさひろ）
公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部
基礎・土構造
研究室長



島田 義則（しまだ よしのり）
レーザー技術総合研究所
主任研究員

「建設機械施工ハンドブック」改訂4版

建設機械及び施工の基礎知識、最新の技術動向、排出ガス規制・地球温暖化とその対応、情報化施工などを、最新情報も織り込み収録。

建設機械を用いた施工現場における監理・主任技術者、監督、世話役、オペレータなどの現場技術者、建設機械メーカー、輸入商社、リース・レンタル業、サービス業などの建設機械技術者や、大学・高等専門学校・高等学校において建設機械と施工法を勉強する学生などに必携です。

建設機械施工技術の修得、また1・2級建設機械施工技士などの国家資格取得のためにも大変有効です。

〔構成〕

1. 概要
2. 土木工学一般
3. 建設機械一般

4. 安全対策・環境保全
5. 関係法令
6. トラクタ系機械
7. ショベル系機械
8. 運搬機械
9. 基礎工事機械
10. モータグレーダ
11. 締固め機械
12. 舗装機械

●A4判／825ページ

●定 価

一般：6,480円（本体6,000円）

会員：5,502円（本体5,095円）

※送料は一般・会員とも沖縄県以外は600円、沖縄県1,050円

●発行 平成23年4月20日

一般社団法人 日本建設機械施工協会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8（機械振興会館）

Tel. 03 (3433) 1501 Fax. 03 (3432) 0289 <http://www.jcmanet.or.jp>