

レーザでトンネル表面の欠陥を探る

篠田 昌弘
構造物技術研究部
(基礎・土構造 副主任研究員)

大村 寛和
同
(同 研究員)



しのだ まさひろ



おおむら ひろかず

はじめに

列車が安全に走行するためには、橋梁、擁壁、盛土、トンネルといった鉄道土木構造物の維持管理を定期的に行う必要があります。鉄道土木構造物の維持管理を行うためには、構造物が健全かどうかを調べる必要があります。これを「健全度診断」といいます。鉄道土木構造物の健全度診断手法には様々なものがあり、構造物ごとに代表的な診断方法があります。鉄道土木構造物の一つであるトンネルを例に挙げると、トンネルの覆工コンクリートの健全度を診断するために、目視や打音検査が実施されています。打音検査とは、ハンマーでコンクリート製の覆工を叩いた時の音で浮きや剥離がないか確認する検査です。ここで、実務上問題となっているのが延長距離の長いトンネルの打音検査です。延長距離の長いトンネルに打音検査を実施すると、多くの人手が必要となり、かつ、高所作業ということ

もあり、検査時間、検査費用、検査労力は多大なものとなり、現場技術者の大きな負担となっているため、打音検査に代わる効率的な検査方法が望まれています。

今回、トンネルの覆工コンクリートの健全度診断の効率化を図るため、非破壊・非接触・遠隔操作が可能な定量的な検査手法の基礎技術を開発しましたので、報告致します。

トンネルの変状

トンネルの覆工コンクリートの変状には、ひび割れを主体とするものと、材料や施工不良等に起因するものの2通りに分類することができます。ひび割れを主体とする変状には、斜めひび割れ、放射状ひび割れ、閉合したひび割れが主な変状となります(図1)。一方、材料や施工不良等に起因する変状には、打ち継ぎ目やコールドジョイント近傍等に発生する剥離やジャンカ等があります。これらの変

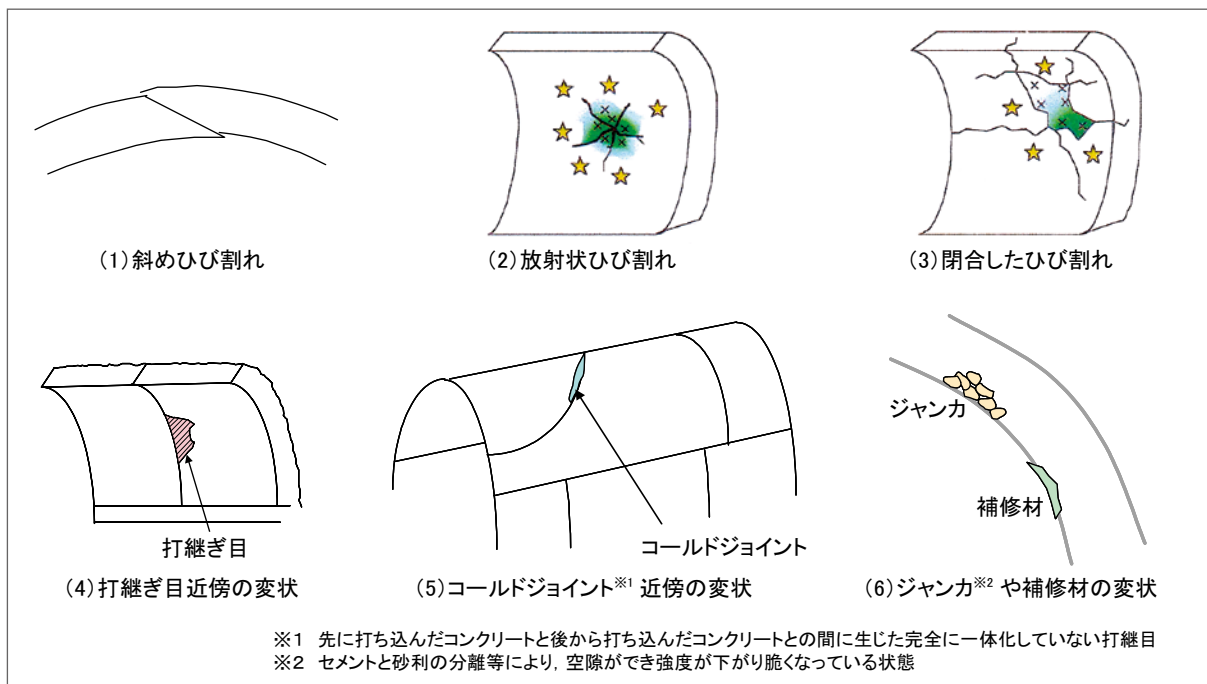


図1 トンネル覆工コンクリートの変状

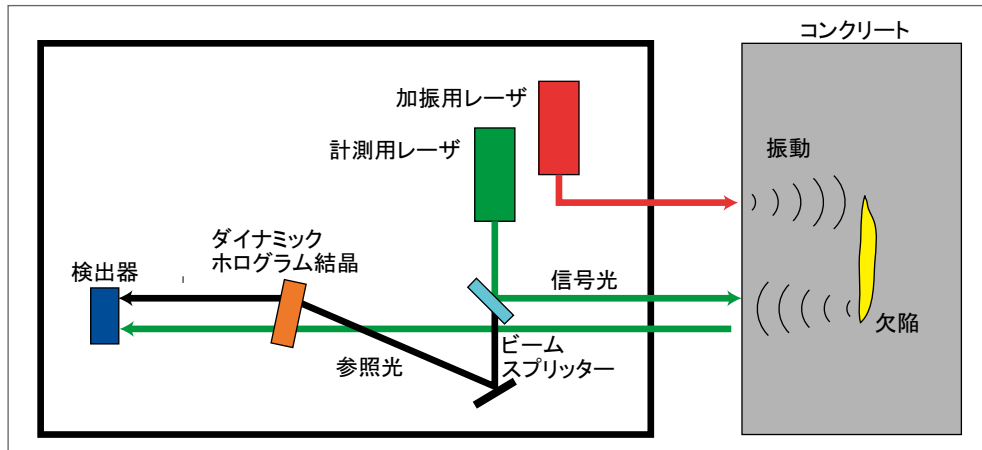


図2 レーザリモートセンシングの基本構成

状は、将来的に剥落に繋がる恐れがありますので、検査により検知する必要があります。前述したように、トンネルの覆工コンクリートのこれらの変状を検知するためには、打音検査により将来剥落するものかどうか判断します。打音検査での音による検査は、検査者間の相違もあり、定量的な評価とならない問題点があります。

レーザーによる健全度診断

レーザーを用いた非破壊検査法の中で代表的な検査法は、レーザー超音波法です。レーザー超音波法は、加振用レーザーと計測用レーザーを用いて行う非破壊検査法であり、一般的な超音波検査と比べると、センサを検査対象に接触させる必要がなく、レーザー光が届く範囲であれば、検査対象に何も接触させずに検査対象の状態を検査できるという大きな特徴があります。しかしながら、レーザー超音波法を適用する場合には、非常に高精度な計測が必要となり、未だ研究段階と言えます。

本研究で開発したレーザーによる健全度診断手法（レーザーリモートセンシング）は、レーザー超音波法と同様に加振用レーザーと計測用レーザーを用います。図2に今回開発したレーザーリモートセンシングの基本構成を示します。レーザー超音波法と異なる点は、加振用レーザーの周波数がレーザー超音波法よりも低い点です。この加振用レーザーの周波数は、室内実験や野外実験の結果を踏まえて、コンクリート表面を効率的に振動させるのに適切な値としています。

加振用レーザーから出力したレーザーは、コンクリート表面の温度を瞬時に上昇させ、熱分解、ガス化を引き起こしま

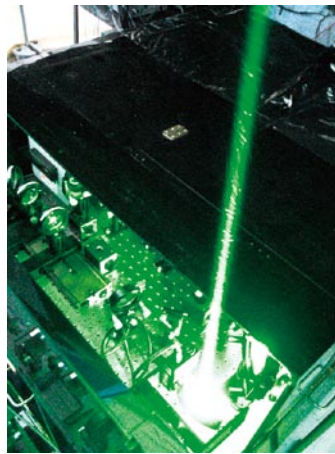


図3 照射されたレーザーの様子



図4 ダイナミックホログラム結晶内で形成した干渉縞

す。この現象をアブレーションといいます。アブレーションで生じたガスが衝撃波となり、コンクリート表面を振動させる力となります。アブレーションで生じたコンクリート表面の振動を計測用レーザーで計測します。

図3に計測用レーザーの照射の様子を示します。計測用のレーザーは、まず、ビームスプリッターで入射光と反射光に分割されます（図2）。反射光は、信号光となりコンクリート表面に反射してダイナミックホログラム結晶を通して検出器に入ります。ビームスプリッターに入射した光は、参照光となり、ダイナミックホログラム結晶を通して検出器に入ります。ダイナミックホログラム結晶内では、信号光と参照光が干渉し合い、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（図4）が形成されます。この干渉縞により、屈折率が変化し、参照光を回折させます。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ため、これを検出することにより、コンクリート表面の微小な振動を計測することができます。

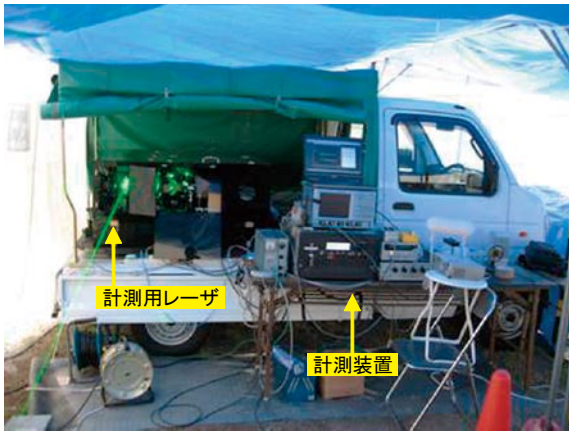


図5 レーザリモートセンシングシステムの試作機



図6 欠陥を模擬した大型コンクリート供試体

図2に示す機構を搭載したレーザリモートセンシングシステムの試作機を開発しました。図5に提案システムの試作機を示します。開発にあたって、検査装置の移動の観点から、図5に示すように軽トラックの荷台に積み込めるようにしました。

レーザによる性能確認試験

図5に示すレーザリモートセンシングシステムの試作機を用いて、図6に示すコンクリート大型供試体へ5m遠方からレーザを照射し、システムの性能確認試験を実施しました。コンクリート供試体は、高さ約1.0m、幅5.8m、厚さ0.5mです。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ます。

代表的な試験結果として、図7と図8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します。ここで、フーリエ振幅スペクトルとは、計測機器が加速度計であれば、横軸に振動数、縦軸に加速度をプロットしたもので、卓越する振動数成分を把

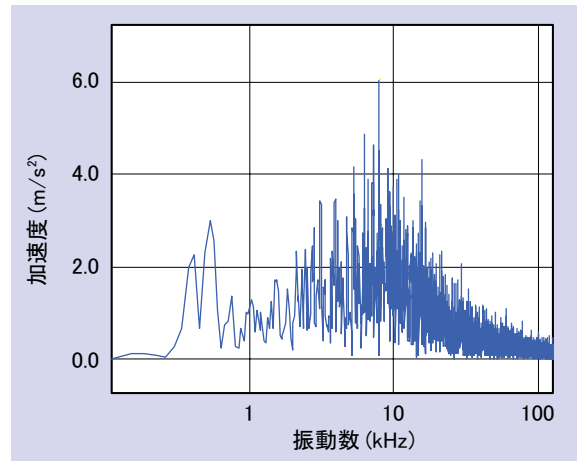


図7 健全な供試体で計測されたフーリエ振幅スペクトル (大型コンクリート供試体)

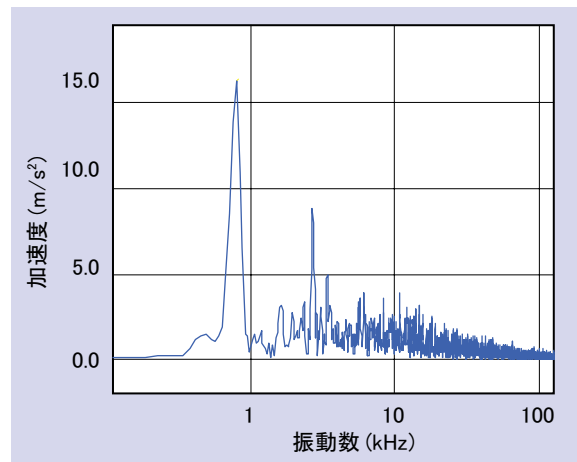


図8 不健全供試体で計測されたフーリエ振幅スペクトル (大型コンクリート供試体)

握することができます。検査箇所は図6に示すとおりです。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しますが、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りました。以上のことから、コンクリート表面の欠陥はコンクリート表面で計測した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の形状で評価できることが分かります。また、5m遠方のコンクリート探傷が可能であることも確認しました。

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波形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ました。つまり、コンクリート表面の加速度波形を収録

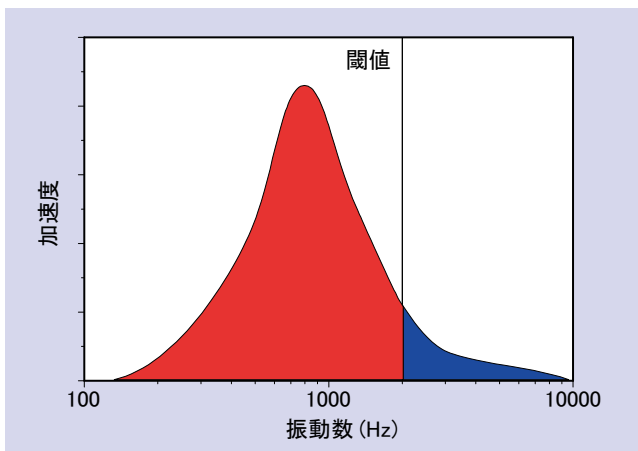


図9 欠陥検出アルゴリズムで用いるスペクトル



図10 検証試験で実施した新幹線橋梁

した後、フーリエ振幅スペクトルを算定し、ある閾値を境にした面積比で評価します(図9)。この面積比をスペクトルスコアと呼びます。閾値の設定には、ボックスカルバート(地盤または盛土中につくられる鉄筋コンクリート箱形ラーメン構造物)、土留め壁、トンネルなどのコンクリート部材に対して、コンクリート表面を加振し、多数の加速度波形を収録して作成したデータベースを用いて決定しました。データベースを用いて検討を行った結果、閾値を2000Hz、スペクトルスコアを0.1と設定すると、打音検査結果と整合性のある結果となり、コンクリート部材の健全度を評価できることが分かりました。

実橋梁での検証試験

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ました。図10に検証試験で実施した新幹線橋梁を示します。図11は、図10に示す新幹線橋梁に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スペクトルスコアを算定し、コンクリート部材の健全度を評価した結果です。コンター

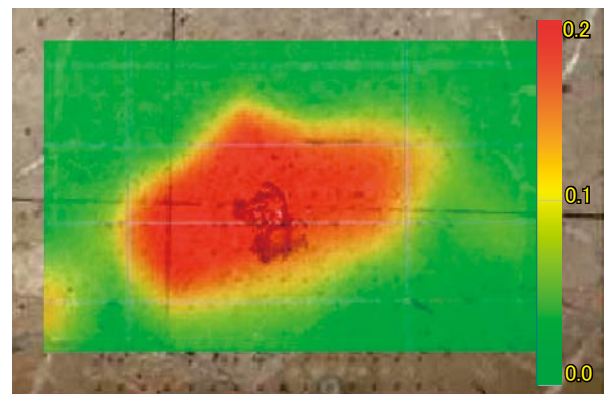


図11 提案法によるスペクトルスコアのコンター図



図12 新幹線トンネルでの検査の様子

図の色が赤いほど、不健全であり、緑であるほど健全です。図11の結果は、別途実施した打音検査結果と概ね整合することを確認しています。以上より、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ります。

おわりに

今回は、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加振を用いたコンクリート欠陥検出システムを開発しました。本試験法を適用することにより、従来の打音検査と比較すると、検査の効率性が飛躍的に向上します。しかしながら、トンネルの覆工コンクリートを高精度に計測するためには、保守用車の振動の除去やレーザーの出力アップを行う必要があり、現在、新幹線トンネルでの検証試験を継続して行っています(図12)。

なお、本研究は、(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機関の共同研究であり、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す。RRR