

講演概要 レーザーを用いた新幹線トンネル 覆工コンクリート欠陥検査手法の開発

御崎 哲一¹・保田 尚俊²・島田 義則³・オレグ コチャエフ⁴・
江本 茂夫⁵・篠田 昌弘⁶・曾我 寿孝⁷・高山 宜久⁸

¹正会員 西日本旅客鉄道株式会社 鉄道本部 技術開発部 (〒530-8341 大阪府大阪市北区芝田2-4-24)
E-mail: norikazu-misaki@westjr.co.jp

²正会員 京都大学 工学研究科 社会基盤工学専攻 (〒615-8530 京都府京都市西京区京都大学桂)
E-mail: yasuda.naotoshi.3x@kyoto-u.ac.jp

³正会員 公益財団法人レーザー技術総合研究所 (〒550-0004 大阪府大阪市西区靱本町1-8-4)
E-mail: shimada@ilt.or.jp

⁴公益財団法人レーザー技術総合研究所 (〒550-0004 大阪府大阪市西区靱本町1-8-4)
E-mail: oleg@ilt.or.jp

⁵株式会社ユニロック (〒194-0215 東京都町田市小山ヶ丘2-2-5-13まちだテクノパーク)
E-mail: emoto@unirock.jp

⁶正会員 防衛大学校 建設環境工学科 (〒239-0811 神奈川県横須賀市走水1-10-20)
E-mail: shinoda@nda.ac.jp

⁷正会員 西日本旅客鉄道株式会社 鉄道本部 技術開発部 (〒530-8341 大阪府大阪市北区芝田2-4-24)
E-mail: toshitaka-soga@westjr.co.jp

⁸正会員 西日本旅客鉄道株式会社 鉄道本部 技術開発部 (〒530-8341 大阪府大阪市北区芝田2-4-24)
E-mail: yoshihisa-takayama@westjr.co.jp

コンクリート表面の一般的な検査方法として打音検査が用いられている。打音検査は簡易であるものの、技術者間で検査結果が異なる、高所停電作業を伴うため墜落・挟まれ・感電災害の危険があるといった課題がある。そのほかの実務的課題としては、新幹線トンネル覆工の検査は、新幹線が運行していない時間帯において線路上を走行する保守用車を用いるため、現地到着までの時間を要し検査可能な時間が少ないこと、また専門の有資格者が必要となりその調整に苦慮すること、検査の実施には多大な時間を要することも挙げられる。そこで本研究では、保守用車を使用せず、高所停電作業を伴わずに、トンネル坑口付近から入坑することができる、レーザーによる加振と遠隔探傷が可能なコンクリート表面の非破壊検査法を開発した。開発した装置を用いて室内試験を実施し基本性能を確認した後、新幹線トンネルの覆工に適用した結果、コンクリート欠陥を精度良く把握できることを確認した。

Key Words : tunnel, non-destructive test, laser remote sensing system, concrete

1. はじめに

現在の社会を築いているコンクリート構造物において、コンクリート劣化による剥落事故が発生している。特に1999年、山陽新幹線福岡トンネル(図-1)および北九州トンネルにおいて発生したコンクリート塊剥落事故¹⁾は、コンクリート構造物の検査の重要性を再認識させた。

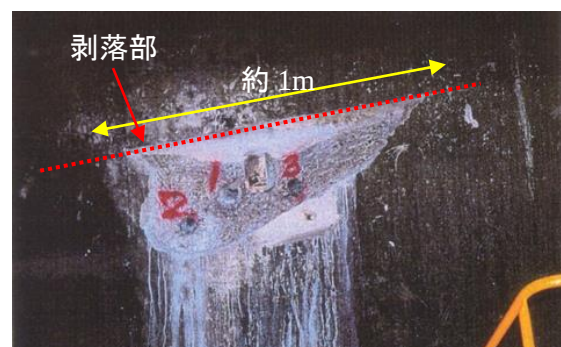


図-1 福岡トンネルコンクリート塊剥落事故

現在の主たる検査手法である打音検査（以下、打音法という）の技術的な課題は、簡易であるものの、技術者間で検査結果が異なることがある。また安全面においては、打音法は高所停電作業を伴うため、墜落・挟まれ・感電災害の危険がある等の課題がある。

検査精度や安全の課題以外の実務的課題としては、新幹線トンネル覆工の検査は、新幹線が運行していない時間帯において、線路上を走行する保守用車を用い、高所停電作業で実施するため、検査作業時間が少なく、専門の有資格者の調整に苦慮することも挙げられる。また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。その上、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。

こうした実情に鑑み、筆者らは、高所作業を要する打音検査に代替し、コンクリート剥離箇所を検査する手法として、レーザーを用いることで、数 m 離れた地上から完全に非接触で検査できる、コンクリート部材の非破壊検査法（以下、レーザー法という）を開発した²⁾。

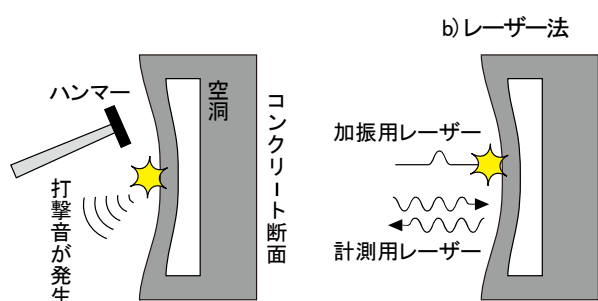


図2 打音法とレーザー法の比較

2. レーザー法の原理

開発したレーザー法について説明する。打音法とレーザー法は、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-2）である。そのためレーザー法は、打音法に代替できる可能性がある。

レーザー法の構成を図-3 に示す。高出力のパルスレーザーを用いてコンクリート表面に短時間で大きなエネルギーを与えると、コンクリート表面成分（セメント等）がプラズマ化され粒子が弾き飛ばされる（アブレーションという）。その反動により、コンクリート表面の振動を励起する。

コンクリート表面振動の計測には、連続発振レーザーを照射しコンクリート表面で反射された光（以下、信号光という）と、元の連続発振レーザー（以下、参照光という）とを干渉させることで、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現れるため、これを検出することでコンクリートの振動が検出できる³⁾。

3. レーザー計測の精度確認

筆者らは、レーザー法で欠陥と健全を判断するために、レーザー計測データのスペクトルを検査者の判定結果と比較することにより、2,000Hz を閾値として、低振動数側を A_1 、高振動数側を A_2 として、その面積比を用いた欠陥判定アルゴリズムを構築した（図-4,5）⁴⁾。式(1)に計算式を示す。

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

ここで Rs をスペクトルスコアと呼ぶこととする。本指標を用い、400 か所以上の全く異なる箇所を検査して各スペクトルスコア値とその箇所の健全性 (α , β , γ) を検査員に判定させた。 α , β は欠陥部、 γ は健全部とした。ここで、検査員判定が欠陥で Rs 値が欠陥である数量と検査員判定が健全で Rs 値が健全である数量の和の

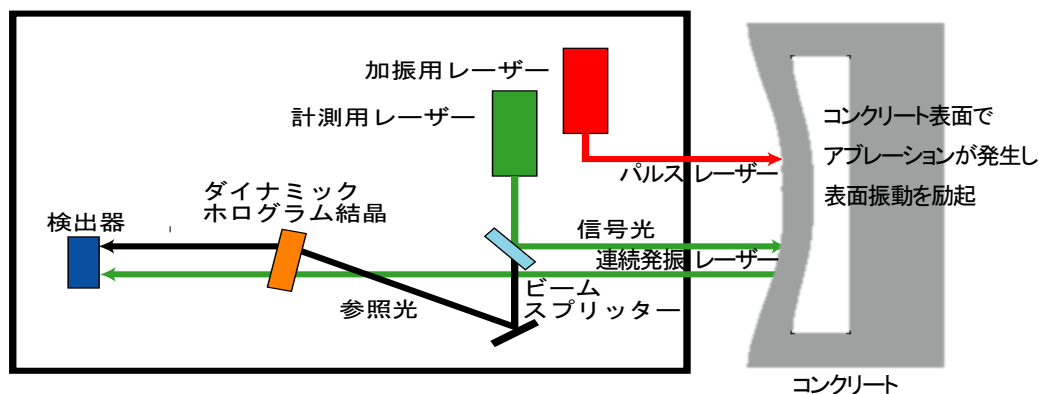


図3 レーザー法の構成

全計測点数の比率，すなわち，検査員判定と R_s 値の判定が一致した比率を合致率と呼ぶこととする．ここで，閾値を 2,000Hz，スペクトルスコアを 0.09 とした場合，合致率が最大の 85.2% となった．しかしながら判定の不整合が約 15% 残存しており，本指標では計測精度に難（図-6）があった．

計測精度を向上させるため，レーザー計測結果の定量化手法を改めて検討することとした．また，レーザー法を用いた，新幹線トンネル中央通路走行型のトンネル覆工コンクリートの剥離欠陥計測装置を試作した（図-7）．検討した定量化手法と試作機器を用いて，供試体及び現地においてレーザー試験を実施し，計測精度を確認した．

(1) 計測結果の定量化方法の構築

現状判定方法の課題として，時系列波形やスペクトルから，振動やエネルギーを確認する方法をとっていたが，人間の検査員が判定できる欠陥部と健全部において，

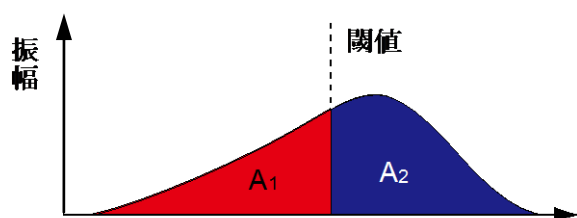


図4 健全部の振動スペクトル

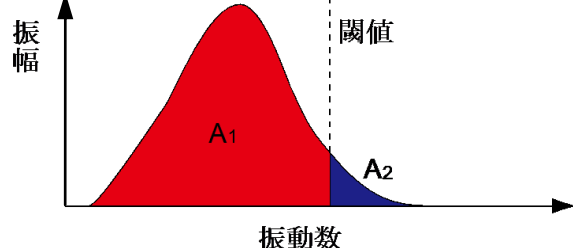


図5 欠陥部の振動スペクトル

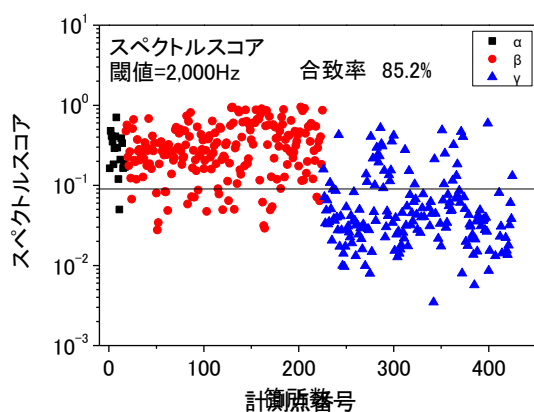


図6 スペクトルスコア R_s と検査員判定の合致率

ノイズによりレーザー計測データが埋没してしまうため，判別できなくなる（図-8）．一方で，レーザー計測信号の特徴として，コンクリート欠陥部は打撃すると特徴のある振動を発生し，固有振動数を確認できる一方，健全部はほとんど振動しないデータとなることが今までの計測で分かっていた（図-9）．

そこで，定量化方法構築の方針として，レーザー加振による振動の傾向から，固有振動数を確認するアルゴリズムとすることとした．

これにより，ノイズによる誤判定を回避することができ，欠陥部の振動を把握する判定方法を構築できた．本方法を用いて計測データを評価することとした．

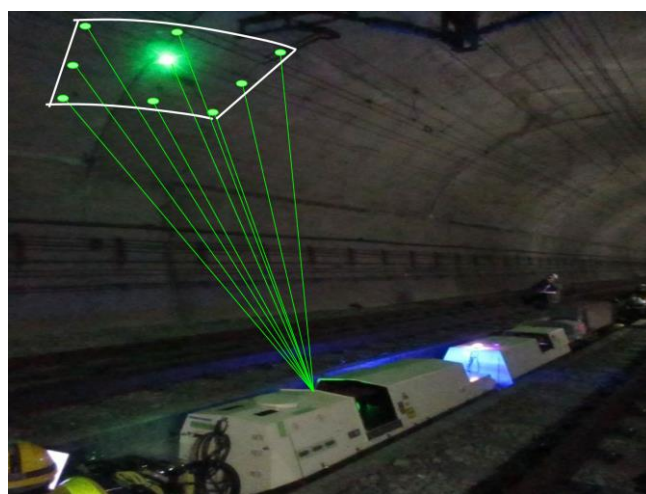


図-7 試作したレーザー計測機器

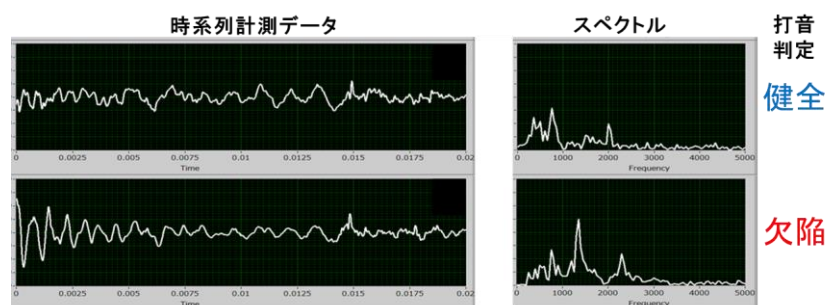


図-8 判別できないレーザー計測データの一例

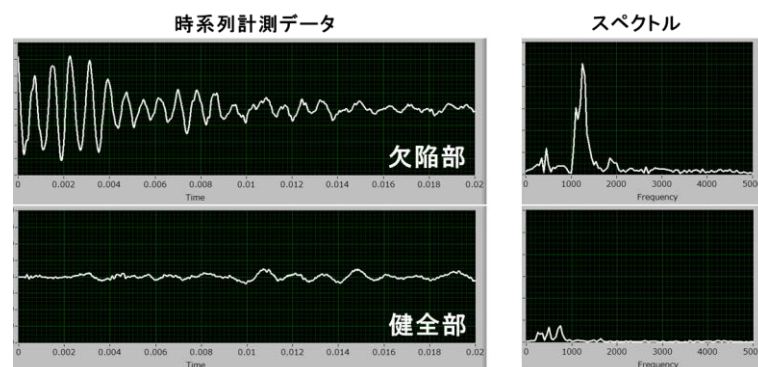


図-9 典型的なレーザー計測データの一例

(2) 計測精度の確認

①剥離変状（斜めひび割れ）を切り込みにより模擬した試験

剥離変状の計測が可能か確認するため、供試体の切り込み深さを変化させて（図-10）レーザー計測を実施した。用いたコンクリート供試体の大きさは、450 mm×450 mm×150 mmである。

新たに構築したアルゴリズムでレーザー計測データを判定した結果欠陥と判定され、固有振動数の低下により進行性把握の可能性があることを示した（図-11）。

また切り込み深さが同じで計測位置が異なる場合のデータより、レーザー計測位置の違いによる固有振動数に概ね差が見られないことから、照射位置が100mm程度変わっても、計測結果に差異がない（図-12）ことを示した。

②新幹線トンネル覆工コンクリートにおける現地試験

鉄筋コンクリート覆工の変状箇所の計測が可能か確認するため、新幹線トンネルの鉄筋腐食・剥離が発生している区間（図-13）、無筋コンクリート覆工の変状箇所の計測が可能か確認するため、異音が発生している区間（図-14）において、レーザー試験を実施した。計測結果データ及び打音検査とレーザー判定結果の比較を示す（図-15,16）。

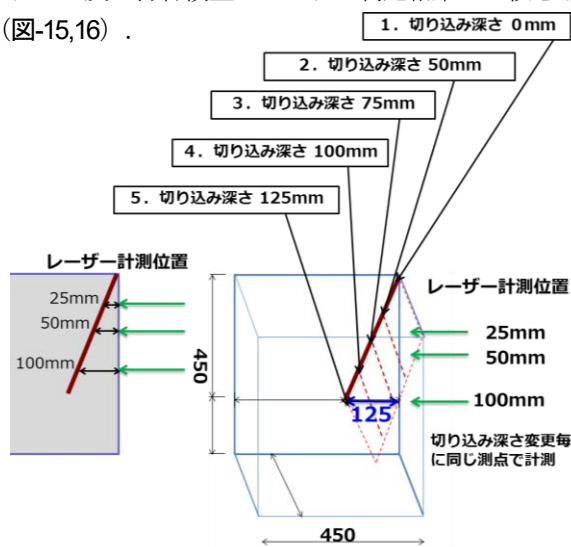


図-10 切り込み供試体

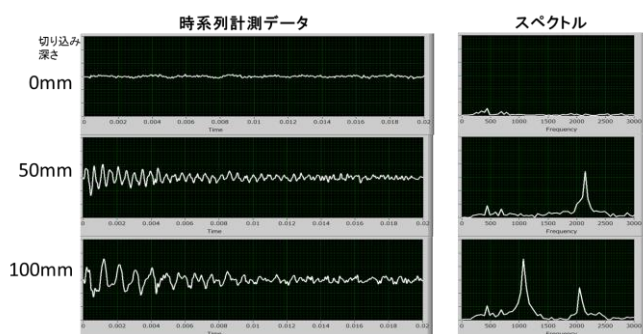


図-11 レーザー計測位置 25mm のデータの例

この結果、欠陥・健全の判定を確実に実施できたことから、本アルゴリズムによる判定精度が高いことを示した。

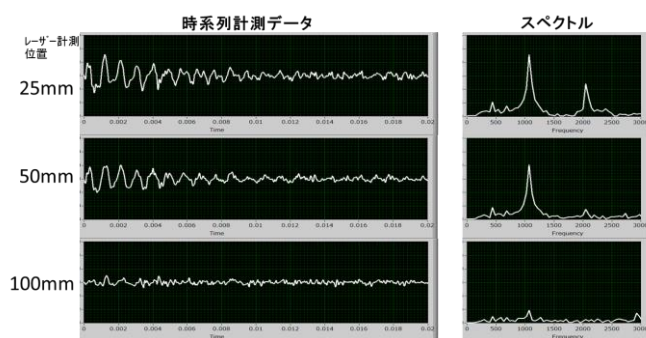


図-12 切り込み深さ 100mm のデータの一例



図-13 鉄筋コンクリート覆工トンネルの試験箇所



図-14 無筋コンクリート覆工トンネルの試験箇所

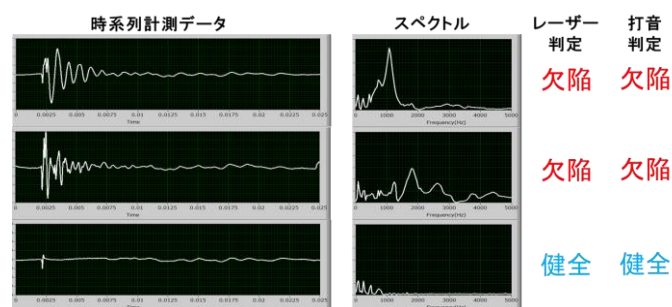


図-15 鉄筋箇所のレーザー計測データの一例

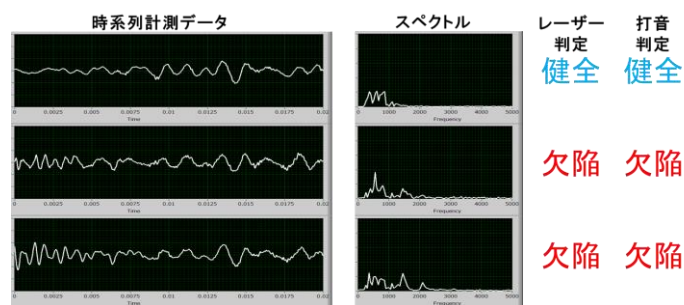


図-16 無筋箇所レーザー計測データの一例

4. まとめ

本研究では打音法に代わる検査法として、レーザーリモートセンシングによるコンクリート部材の欠陥検出システムを開発した。以下に成果を述べる。

- [1] レーザーリモートセンシングを用いたコンクリート部材の剥離欠陥検出システムの試作機を、新幹線トンネル中央通路を走行するタイプとして開発した。
- [2] レーザー計測結果を定量化する方法を構築した。
- [3] コンクリート供試体を用いた、剥離変状（斜めひび割れ）を切り込みにより模擬した試験から、剥離進行性を把握できる可能性を示した。合わせて、計測のためのレーザー照射位置のずれを多少であれば許容できる可能性を示した。
- [4] 山陽新幹線トンネルの鉄筋・無筋コンクリート覆工区間の変状箇所にて、レーザー計測試験を実施し、計測精度を確認した。その結果、欠陥・健全の判定を確実に実施できたことから、本手法による計測精度があることを示した。

今後は、さらにレーザーによる計測データを積み重ねることで信頼性を向上させるとともに、目視検査による欠陥位置情報と組み合わせ、そこにレーザーを照射できるようにすることで、計測速度の向上を図ることが必要である。本技術を用いた新たな検査手法として、今後の運用を含めた形で完成させたいと考えている。

参考文献

- 1) 足立紀尚：トンネル安全問題検討会－保生技術の確立－，日本鉄道施設協会誌特集『コンクリート』，pp.14-15, 2000.
- 2) 御崎哲一，坂本保彦，島田義則，オレグコチャエフ，篠田昌弘，大村寛和，内田成明：レーザーリモートセンシングによるコンクリート部材の非破壊検査法の開発，鉄道力学論文集，No.13, pp.51-57, 2009.
- 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－，土木学会第63回年次学術講演会，6-056, pp.111-112, 2008.
- 4) 御崎哲一，曾我寿孝，高山宜久，中澤明寛，朝倉 俊弘，保田尚俊，島田義則，オレグコチャエフ，篠田昌弘，江本茂夫：レーザーを用いたコンクリート構造物の非接触計測技術の開発－(1) 装置概要と試験状況－，土木学会第71回年次学術講演会，VI-733, pp.1465-1466, 2016.

(2017. 4. 7 受付)

DEVELOPMENT OF SHINKANSEN TUNNEL LINING CONCRETE DEFECT INSPECTION METHOD USING A LASER

Norikazu MISAKI, Naotoshi YASUDA, Yoshinori SHIMADA, Oleg KOTYAEV,
Shigeo EMOTO, Masahiro SHINODA,
Toshitaka SOGA and Yoshihisa TAKAYAMA

Non-destructive inspection method for concrete lining was proposed by using lasers for excitation and detection. Laboratory tests were conducted to confirm the basic performance with the developed system and it applied to actual tunnel lining for bullet train. Consequently, it was confirmed that the developed system can measure the vibration characteristics of concrete lining.