

講演概要 レーザーを用いたコンクリート剥離検知機器車両の開発

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

トンネルの覆工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、鉄道トンネル覆工の検査は、列車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、鉄道トンネル坑口付近から入坑することができ、遠隔・非接触でコンクリート表面の異音箇所を計測可能な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、人による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、

鉄道トンネル覆工の検査は、列車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。

こうした実情を鑑み、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）を開発したり。

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-1）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-2 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²⁾。

3. レーザー機器車両の試作

(1) 計測機器に求められる機能

先ほど述べたトンネル打音検査の課題を解決するために、求められる機能は以下のとおりである。

- ① 遠隔非接触の検査手法
- ② 計測結果を定量化
- ③ トンネルの中央通路から補い作業で検査

(2) 機能を満たす解決方針

(1)の機能を満たすため、以下の解決方針を採用することとした。

- ① レーザー法の活用
- ② コンクリート剥離状態の数値化
- ③ トンネルの中央通路を自立走行・自立計測できる、建築限界支障をしない検査車両化

(3) 機器試作のための要件整理

(2)の解決方針に則り、要件を以下に整理する。

①の要件

a)加振レーザー（ハンマー代替）

離隔 8～10m でコンクリート剥離部を振動させられる

b)検出レーザー（人の耳を代替）

コンクリート剥離部の振動を検出できる

c)クラス 4 レーザーに対する安全管理

加振レーザー、検出レーザーに関しては、レーザー法の原理で述べたが、強力なレーザーエネルギーでコンクリートを加振させ、その振動を出力の大きいレーザーで計測（図-3）している。すなわち、目に入ると失明するクラス 4 レーザーを用いており、その安全対策が必須となった。

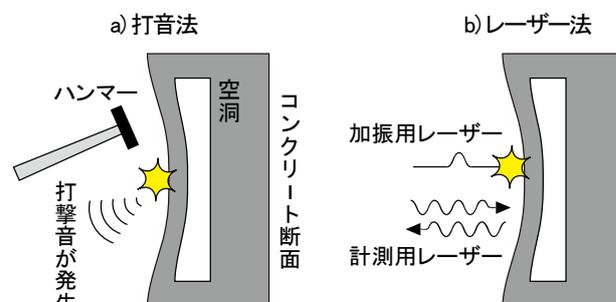


図-1 打音法とレーザー法の比較

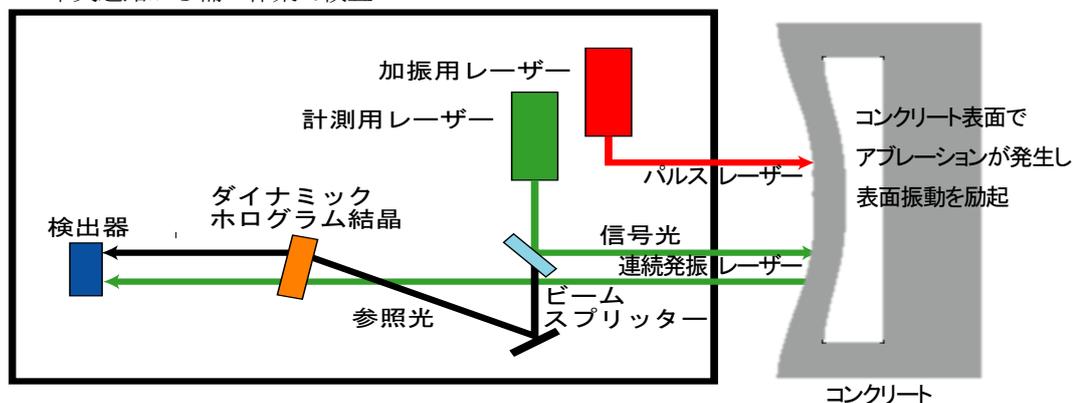


図-2 レーザー法の構成

そこで、クラス4のレーザーが直接眼に入らないように、立入禁止区域を設け、人感センサー及び非常停止スイッチ(図-4)によるレーザー遮断機構を搭載(図-5)した。

また、必要に応じ保護メガネ(図-4)を着用している。

②の要件

- a) コンクリート剥離状態を数値化する手法を構築する
- b) データが現地ですぐに確認できる

打音検査者が異音と判断する箇所におけるレーザー

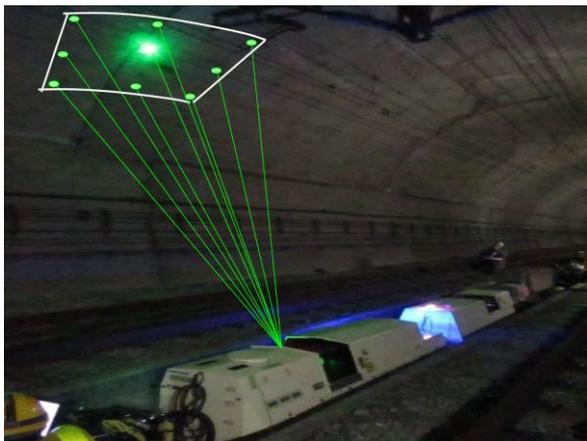


図-3 試作したレーザー計測機器



図-4 人感センサー, 非常停止スイッチ, 保護メガネ

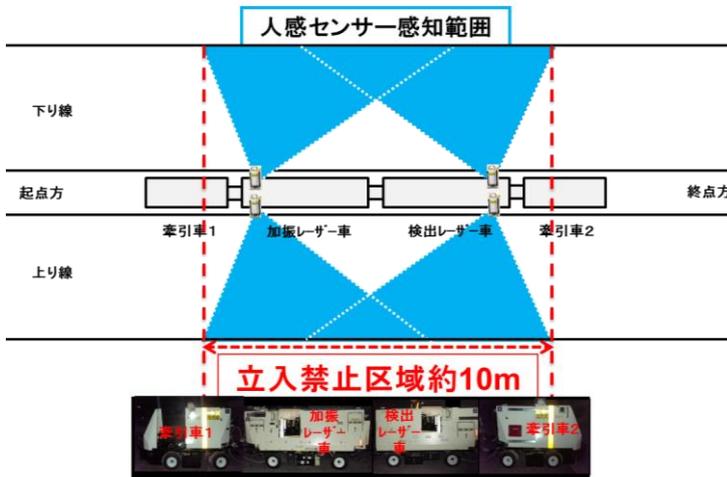


図-5 クラス4レーザーに対する安全管理

計測データは、加振レーザー照射後から徐々に振動が減衰する時系列を示す(図-6)と共に、卓越する固有振動数を持つ。その減衰振動の固有振動数³⁾から、最低次モードの固有振動数を算出することによって数値化し、異音判定アルゴリズムを構築した。

レーザー計測するに当たっては、パソコンの画面上からの操作で全て完結するようにし、作業性が高く、誰でも使用可能な機器として構築することを目指した。

現場ではカメラからのトンネル覆工画像をパソコン画面に映し、その画像上でレーザー計測したい箇所をマウスでクリックすると、レーザー計測結果は即座に異音判定アルゴリズムにより色表示(図7)される仕組みを構築した。

③の要件

- a) 新幹線用トンネル巡回車の共通仕様書に準じた構造を持ち、想定される地理的条件で走行できる
- b) トンネルを走行できレーザー計測出来る電源を持つ

建築限界を侵さないように、トンネル巡回車の全幅・全高を準用し、あわせて中央通路に取りつくための登坂・旋回能力、レーザー機器を安全に運搬できる除振機構を持たせた。

電源に関しては、JR 西日本管内のトンネル延長を考慮し、20km程度の走行および4時間半程度連続計測に必要な蓄電池・発電機を搭載している。

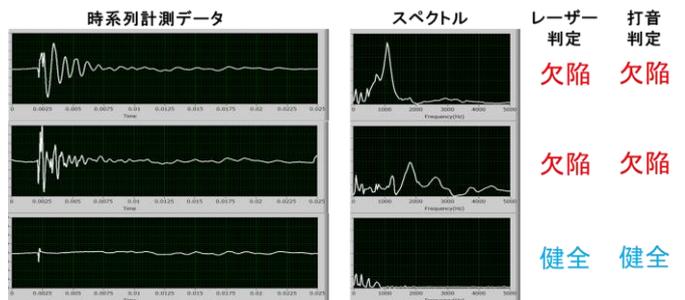


図-6 レーザー計測データの一例

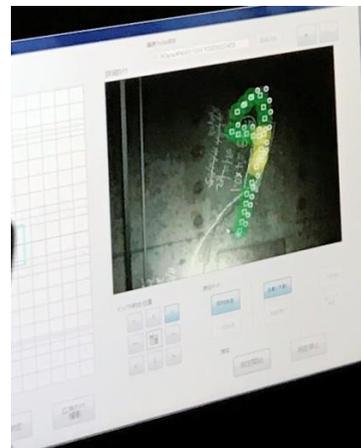


図-7 計測画面の一例

3. レーザー計測データの傾向

今回、山陽新幹線トンネル内において予め打音検査を行い、異音箇所と健全と判定された箇所を複数選定し、それらに対してレーザー計測を実施した。最低次モードの固有振動数とその度数分布を示したのが図-8である。

これによると、綺麗な正規分布ではなく、2,500Hzを越えた箇所にも一定数計測される、標本が分離された分布となった。

その原因を推定するため、打音検査している状況を録画した映像と音響を確認した。その結果、打音検査者はある「音色（固有振動数）」を悪い、と判断しているのではなく、周辺のコンクリートを常に打音しながら、ターゲットとしている箇所に対して打音し、周辺のひび割れや漏水等の状況とあわせて判定しているように推定された。

このことは、コンクリート打音の音色の違いがあっても、その中でより音色の悪い箇所を探し出し、目視検査情報を加味した上で覆工にチョーキングしている、と解釈ができ合理的である。本装置は定量的にコンクリート表面の固有振動数を計測するため、閾値を設定することで、打音検査者が行っていた剥落可能性の高いもののみを抽出できる可能性を見出したと考えている。

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および異音判定アルゴリズムを構築し、システムとして開発した。以下に成果を述べる。

- (1) レーザー計測機構をトンネル巡回車型車両に搭載し、トンネル中央通路を走行するタイプとして開発した。
- (2) クラス4レーザーに対する安全対策を具備した。
- (3) 現地でパソコンで計測し、即座に計測結果が表示されるシステムとした。

- (4) レーザー計測データの傾向と打音の映像・音響の確認により、定量的な閾値を設定することで剥落可能性の高いものを抽出できる可能性を見出した。

今後は、さらにレーザーによる計測データと打音確認を積み重ねることで判定閾値の信頼性を向上させることを考えている。本技術を用いることで、打音検査を実施している労力を少しでも低減することができれば幸いである。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 御崎哲一, 保田尚俊, 島田義則, オレグコチャエフ, 江本茂夫, 篠田昌弘, 曾我寿孝, 高山宜久: 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, 鉄道工学シンポジウム論文集第21号, pp.115-119, 2017.7.

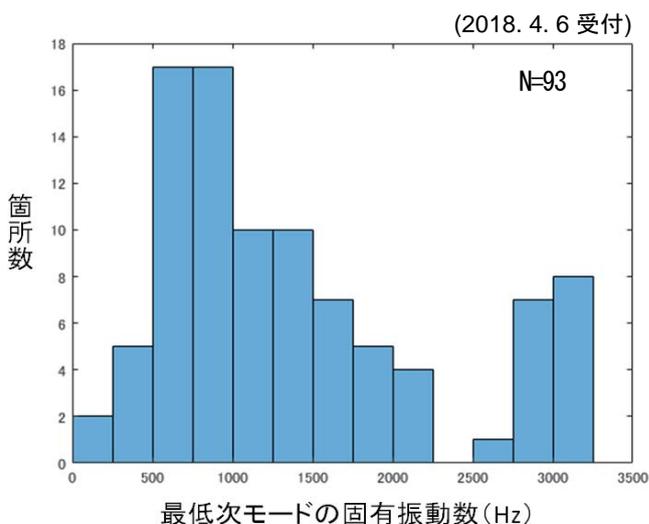


図-8 レーザー計測データの度数分布

Development Of Concrete Detachment Detection Equipment Vehicle Using 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.