

レーザー打音検査装置を用いた 診断支援技術の社会実装への取り組み

かうち ゆうき おおで あきひろ きのした ゆうじ よしなが あつと
賀内 悠生¹・大出 晃弘¹・木下 雄志²・吉永 敦音²

¹株式会社 建設技術研究所 東京本社（〒103-8430 東京都中央区日本橋浜町3-21-1）

²株式会社 建設技術研究所 大阪本社（〒541-0045 大阪府大阪市中央区道修町1-6-7）

トンネル点検作業は、技術者の技量による診断結果の差異が生じやすく、危険を伴う高所作業であるなど、課題が多く存在する。これらの課題を補完・支援するための技術として、レーザー打音検査装置が、国土交通省のトンネル点検支援技術性能カタログに掲載されている。本研究においては、レーザー打音検査装置を診断支援技術として社会実装することを目的として、代表的な損傷を再現した供試体を用いて実験を行い、損傷レベルと計測値の関連性を確認するとともに、実際のトンネル点検における診断支援に活用した。供試体実験と診断支援活用の結果を整理し、レーザー打音検査装置の活用効果と今後の課題について考察する。

Key Words：維持管理，トンネル点検，覆工コンクリート，リモートセンシング，レーザー打音検査装置，健全性の診断

1. はじめに

道路トンネル（以下、トンネル）は、通行が困難となった場合に適切な迂回路がなく、交通に大きな影響を与えることが多い。そのため、トンネルの維持管理においては、細心の配慮が必要であり、今後トンネルの老朽化が進む中で、道路利用者の安全を確保するためには、点検・診断・措置・記録といったメンテナンスサイクルに沿った維持管理を適切に実施していくことが重要である。

トンネル維持管理における点検作業は、熟練点検技術者による近接目視や打音検査での適切な診断を必要とし、多くの手間や時間を要するとともに高所での危険を伴う作業である。また、点検技術者の技量による診断結果の差異が生じやすい。これらの課題を解決するため、点検技術者の技量によらない定量的な判断基準を持ち、高所作業が不要な、遠隔・非接触計測技術である「レーザー打音検査装置」による、トンネル点検の診断支援が期待されている。

令和2年度に道路トンネルの点検業務に対応したレーザー打音検査装置¹⁾が点検支援技術性能カタログ・非破壊検査技術（トンネル）²⁾に登録されたことで、道路トンネル定期点検業務（以下、トンネル点検）での使用が可能となっている。

本研究では、トンネル覆工コンクリート（以下、覆工）目地部の内部損傷を複数の損傷レベルで再現した供試体を製作し、レーザー打音検査装置による計測を行うことによって、損傷レベルと「振動波

形」及び「振幅」の関連性を確認し、コンクリートの内部損傷の定量データ化が可能であることを確認した。また、供試体を用いて、レーザー打音検査と熟練点検技術者による近接目視及び打音検査による診断との比較を行い、熟練技術者による診断と同等以上の精度が確保されていることを確認した。

供試体試験の結果を踏まえ、実際のトンネル点検業務において、国内のトンネルで初めてレーザー打音検査装置を診断支援に試行的に活用した。実トンネルでの変状の大半を占める「うき・はく離」と施工不良等によって発生し、コンクリート強度低下の原因となる「豆板」を対象にレーザー打音検査を実施し、点検技術者による診断と同等以上の精度が確保されていることを確認した。一方で、検査速度等、今後の社会実装への課題も明らかになった。

本論文においては、供試体実験、実トンネルでの診断支援活用結果を整理し、レーザー打音検査装置の活用効果と課題について考察する。

2. レーザー打音検査装置

(1) レーザー打音検査装置の概要

レーザー打音検査装置（写真-1）は、ハンマーの代わりに覆工を振動させる「振動励起レーザー」と、耳もしくは手の代わりに表面の振動を計測する「振動計測レーザー」の2種類のレーザーを用いることで、打音検査を遠隔・デジタル化することを可能と

した装置である（図-1）。1回の計測範囲は50cm×50cmで、横断方向は180°以上、縦断方向は約2.5mが計測可能範囲である（写真-2）。車道上から計測するため、点検技術者が高所で近接目視及び打音検査を実施する必要がなく、作業時の安全性が確保される。レーザー打音検査の結果は、「音波」ではなく「可視化されたコンクリート表面の変位データ」として記録される。内部に損傷等の構造が存在する場合には振動の共鳴により特定の周波数が強く観測されるため、振動波形に着目する事で欠陥の検知が可能である。また、振幅に着目することで、損傷の程度を評価することが可能であると考えられる。なお、診断できる深さは欠陥の形状にもよるが、概ねコンクリートの表面から3～5cm程度である。

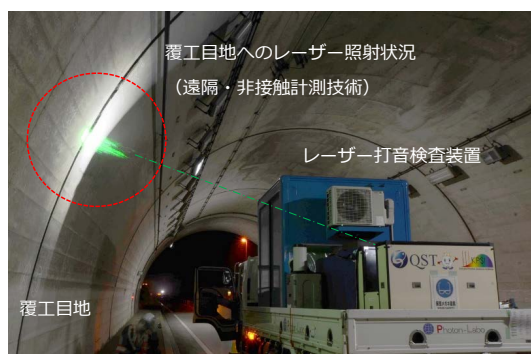


写真-1 レーザー打音検査装置による計測状況³⁾

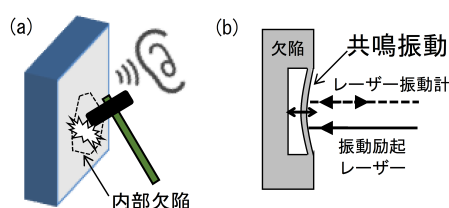


図-1 レーザー打音検査による欠陥検知の原理³⁾



写真-2 レーザー打音検査装置による計測範囲

(2) 診断支援に活用するための課題

実際のトンネル点検業務において、うき・はく離は、熟練点検技術者による打音検査によって、検知・診断されるため、技術者による診断結果の差異が生じやすい。また、うき・はく離の規模・位置は、点検時のスケッチと損傷部分のみの写真で記録され、正確な損傷状況の把握が難しく、前回点検時からの損傷進行性の評価、補修設計時の範囲設定が不確実

になっている。

上記の課題を踏まえ、実際のトンネル点検業務の診断支援として効率的に活用していくためには、レーザー打音検査装置に必要な機能として、以下が必要になると考えた。

- ・うき・はく離に対し、熟練点検技術者と差異が生じない定量的な診断基準を持つことが必要。
- ・点検技術者が実施する打音検査と同等以上の精度を持つことが必要。
- ・損傷の範囲・位置の情報を正確に取得することが必要。

3. 供試体による検証実験

実際のトンネル点検で、レーザー打音検査により道路利用者の安全性を確保するためには、内部損傷の程度とコンクリート表面の振動の関係を明らかにする必要がある。そのため、トンネルの代表的な変状である「うき・はく離」を再現した複数の供試体を使用し、検証実験を行った。

(1) 代表的な損傷の選定

トンネルの変状は、「外力」「材質劣化」「漏水」の大きく3つに分類される。これまでのトンネル点検の実務経験などによれば、トンネル変状の大半は、「外力」または「材質劣化」に起因する覆工目地部の「うき・はく離」である。覆工目地部は、コンクリート面が分離された部分であり、周辺にクラックが発生した場合、目地部と繋がりブロック化することで、「うき・はく離」となる可能性が高い。更に、「うき・はく離」が進行し、はく落することで、道路利用者への被害が懸念されることから、覆工目地部の診断と、その叩き落としに点検時間の多くを要している。そのため、レーザー打音検査装置に適用する変状として、「うき・はく離」を設定する。

覆工目地部に変状が発生しやすい主要因として、以下が挙げられる。

- ・覆工打込み時の型枠据付けにおいて、既打込み側コンクリートの十分な強度の発現前に新設側のコンクリートを打込むため、型枠据付け時に、既打込み側コンクリートに過大な荷重をかけ、コンクリート内部にクラックが発生する。
- ・覆工目地付近に温度収縮による応力が集中し、ひび割れ、うき・はく離が発生する。
- ・施工不具合等で生じた段差等を補修した化粧モルタルがはく落する。

(2) 内部損傷の再現

本研究では、覆工目地部の代表的な内部損傷として、コンクリート内部に埋め込んだ鉄筋を電食させ、クラックを発生させることで、「うき・はく離」を再現した（図-2）。電食率によりクラックの状態を制御することで、表-1に示すように腐食度5%、10%、15%の供試体を作製した。腐食度15%では垂直面と側面を貫通するクラックが形成されている。

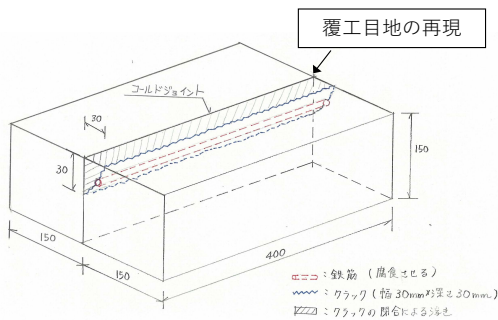
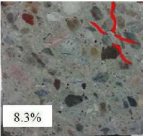
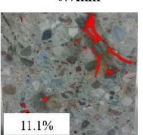
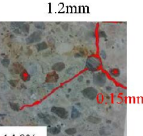


図-2 覆工目地部を再現した供試体³⁾

表-1 腐食率と内部損傷状況の関係

腐食率	供試体	内部損傷状況
5%	垂直面 0.5mm  8.3%	垂直面（覆工面）に幅 0.5mm 程度のクラックが発生している状況。貫通・うきは生じていない。
10%	0.7mm  11.1%	垂直面と側面（目地部）に半円状の貫通クラックが成長している段階。打音検査ではうきと診断される可能性がある。
15%	1.2mm  14.9%	垂直面と側面に半円状の貫通クラックが発生した段階。打音検査では、うきと診断される。

(3) 点検技術者とレーザー打音の診断結果比較

本供試体を用いて、現役かつ点検経験が 20 年以上の熟練点検技術者 2 名による診断（以下、人力打音）との比較を行った結果を図-3 に示す。人力打音では 2 名ともが欠陥ありと判定した箇所と、1 名のみが欠陥ありと判定した箇所が存在し、技術者による診断結果の差異が生じた。しかしながら、図-3 の青枠に示すように、2 名ともが欠陥ありと判定した箇所においては、レーザー打音検査装置の判定結果と一致していることから、レーザー打音検査による異常箇所の見逃しは発生せず、人力打音と同等以上の精度が確保できていることが確認された。

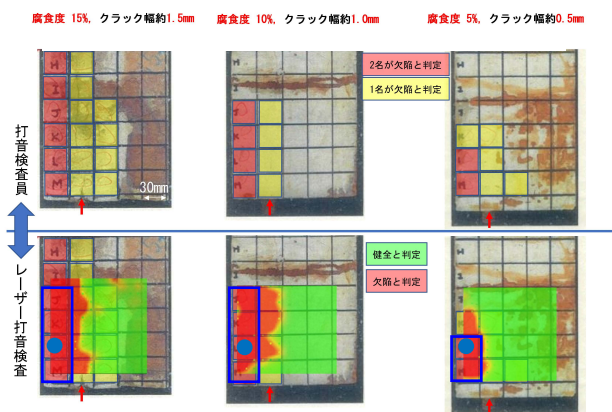


図-3 人力打音とレーザー打音検査装置との比較³⁾

(4) 供試体実験の結果と考察

図-4 に、レーザー打音検査装置により計測された振動波形を示す（図-3 の●位置）。実験の結果、全腐食度の欠陥判定箇所について、2.6kHz での共鳴振動が確認されている。また、腐食の進行に伴い、振動波形の複雑化及び振動ピーク値の増大傾向が確認されている。これは、クラックが貫通したことで供試体の構造が複雑化したことによる振動ピークの分裂、供試体の強度が低下したことによる振幅の増大が考えられる。以上の結果より、振動波形と振幅に着目することで、損傷の検知・損傷状況の評価が可能であると考えられている³⁾。

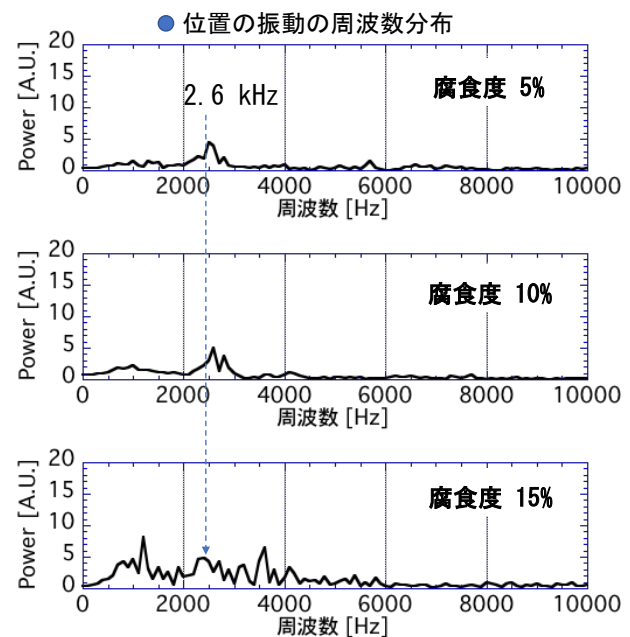


図-4 レーザー打音により観測した振動波形³⁾

4. トンネル点検の診断支援への活用

実際のトンネル点検で診断支援として活用するにあたり、事前に行った従来の近接目視及び打音検査による点検結果（以下、従来点検）から、代表的な変状としてトンネルの変状で大半を占める覆工目地のうき及び豆板を選定し、適用した。

図-5 に覆工目地部のうきに適用した結果を示す。従来点検でうきと判定された目地周辺及び目地内側において、共鳴振動が確認された。濁音範囲の広い目地周辺部①と、濁音範囲の狭い目地周辺部②を比較すると、①の波形は、より複雑でピーク値の高い振動箇所が確認されている。これは、損傷の構造が比較的複雑でかつ結合が弱い（はく落の可能性が高い）ことを示しており、②よりも損傷が進行していることを示していると考えられる。

図-6 に覆工目地部の豆板に適用した結果と当該豆板箇所における従来点検との比較結果を示す。豆板は、打設されたコンクリートの一部がセメントペーストの充填不足によって粗骨材が多く集まり、空隙の多くなった不良部分である。適切に施工され

たコンクリートと比較して強度が低下するため、トンネルとしての耐久力低下を招く変状であり、覆工目地部に多く発生する。従来点検において豆板が確認され、損傷ありと診断された範囲③に加え、従来点検で豆板が確認されず、健全と評価した範囲④においても、異常を示す振動を計測した。これは、従来点検における打音検査は、覆工面の近接目視により異常が確認された箇所に対して実施されるため、表面に豆板が発生していない箇所に対して、従来点検では検知できなかった損傷を、レーザー打音検査装置によって確認できたことを示していると考えられる。以上より、レーザー打音検査装置による計測は、従来点検と同等以上の精度が確保されていると言える。

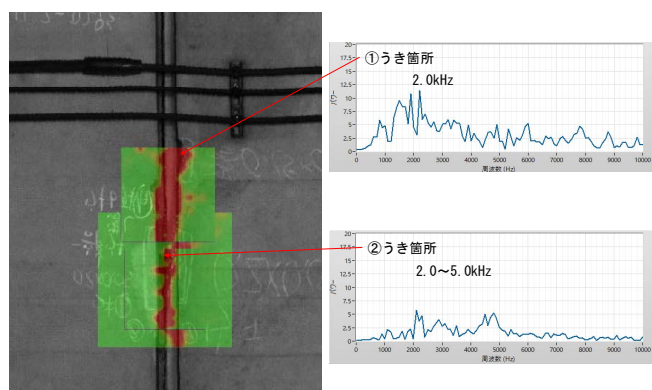


図-5 覆工目地部へのレーザー打音検査の適用（うき）

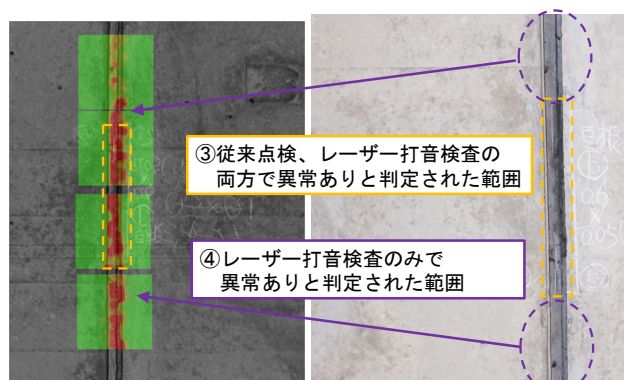


図-6 覆工目地部へのレーザー打音検査の適用（豆板）

5. レーザー打音検査装置の導入効果と課題

本研究によって、レーザー打音検査を用いることで、コンクリートの内部損傷の定量データ化が可能であることを確認した。点検技術者による近接目視及び打音検査での診断結果と同等以上の精度を確保

できることを確認した。

「レーザー打音検査装置」をトンネル点検業務の診断支援として導入することで、技術者の技量による診断結果の差異の解消、損傷位置・規模等の損傷情報の高精度化による損傷進行性の評価、補修設計の最適化及び点検作業における安全性の確保が期待できる。

しかし、現状でのレーザー打音検査は、計測ピッチが数 cm 程度と非常に細かい。実際に診断支援に活用した実測値として、表-2 に示すようにレーザー打音検査装置による目地 1 箇所あたりの計測で、準備から片付けまでに要した時間は約 45 分であり、同範囲を人力打音によって点検した場合（約 5 分）と比較して 9 倍程度の時間を要している。そのため、今後の社会実装に向けて、準備及び打音範囲設定時間の短縮、計測ピッチをコントロールすることによる計測速度の向上が必要になると考える。また、供試体実験を継続的に実施し、損傷の程度と振動波形及び振幅との関連性の知見を深めていくことで、「すぐに叩き落とさなければならぬうき・はく離」、「将来問題となる可能性があるが、早期にはく離する可能性は低いうき・はく離」、「うき・はく離のない部分」に分類する機能が必要であると考えられる。

表-2 レーザー打音検査の所要時間（目地 1 箇所）

項目	所要時間
車両移動・準備	5 分
打音範囲設定	5 分
レーザー打音計測	30 分
計測結果確認・片付け	5 分
合計	45 分

謝辞：本論文の執筆にあたり、量子科学技術研究開発機構、株式会社フォトンラボにご協力・ご助言いただきました。厚く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 長谷川登, 錦野将元, 岡田大, 近藤修司, 北村俊幸, 木暮繁 “高出力レーザーによるインフラ長寿命化に貢献する先進診断技術—レーザー打音検査装置—”, フォトニクスニュース 第7巻 第1号 2021年, pp20-24
- 2) 株式会社フォトンラボ, “レーザー打音検査装置”, 国土交通省, 点検支援技術性能カタログ (案) 非破壊検査技術 (トンネル) (2020) pp. 2-283 - 2-287.
- 3) 戸本悟史, 長谷川登, 北村俊幸, 藤崎能正 “レーザー打音検査装置による浮き・剥離のデータ化への挑戦”, 総合土木技術誌 土木施工, 2021, Jul, VOL. 62, No. 7