

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究終了報告書】

①研究代表者		氏名 (ふりがな)		所属		役職	
		中村 光 (なかむら ひかる)		名古屋大学大学院		教授	
②研究 テーマ	名称	レーザー打音検査装置を用いた橋梁・トンネル等の道路構造物のうき・剥離の定量的データ化による診断技術の技術研究開発					
	政策 テーマ	[主テーマ] タイプIV [副テーマ] なし		分科会/ 公募タイプ	タイプIV ハード分野		
③研究経費 (単位: 万円) ※端数切り捨て。実際の研究期間に応じて記入欄を合わせる こと		令和2年度	令和3年度	令和4年度	総合計		
			45,989,900円 (税込み)	37,961,000円 (税込み)	83,950,900円 (税込み)		
④研究者氏名		(研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)					
氏名		所属・役職 (※令和5年3月31日現在)					
長谷川 登		量子科学技術研究開発機構関西光科学研究所 主幹研究員					
野村 貢		株式会社建設技術研究所・上席技師長					
戸本 悟史		株式会社建設技術研究所・東京本社道路交通部 部長					
石田 辰英		株式会社建設技術研究所・本社 技術本部 品質環境安全管理部次長					
安部 正道		株式会社 計測検査 調査部 部長					
坂本 勝哉		株式会社 フォトンラボ 企画本部技術企画室スタッフ					
⑤研究の目的・目標		(提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。)					
研究の目的		トンネル点検で社会実装が進みつつあるレーザー打音検査装置について、音波ではなくコンクリート表面の変位(動き)を遠隔で計測できるレーザー打音検査装置の特徴を活かし、「うき・剥離の状態」を定量的データ化することで、検知・記録から診断する技術へ進化させ、橋梁等の道路構造物にも適用範囲を広げるとともに、従来点検以上の品質と効率性の向上を実現する。					
研究の目標		本研究では、上記の目的を実現するために4テーマを構築し、相互に連携して総合的な成果達成を目指す。					
【テーマ1】レーザー打音検査装置による計測方法の高速化技術の開発		レーザー打音検査に支障となる障害物を避け、うき・剥離の可能性が高い部位は自動的に打音間隔を変え、精緻に計測する制御機能を実装する。					
【テーマ2】レーザー打音検査装置の橋梁構造物点検に向けた改良		高架橋や広幅員の橋梁に適用できるようにレーザー打音検査装置のロングレンジ化を図る。					
【テーマ3】レーザー打音検査装置への複数の状態の異なるうき・剥離の検出能力付与		レーザー打音により取得される変位の波形異常を関係付け、様々な状態のうき・剥離が検出できるようにする。					
【テーマ4】継続的な観察や措置に役立つ記録様式と診断支援となる閾値や評価方法の構築		テーマ3で実施した実験結果を基に本研究で目指すうき・剥離の損傷検知レベルをⅢ(直ちに措置が必要)、Ⅱ(経過観察)、Ⅰ(健全)に分類し、客観性のある計測データとして可視化、記録・評価する技術を実装する。					

⑥これまでの研究経過・目的の達成状況

4つのテーマの達成目標を表-1に、各テーマの相関図と各研究者の役割を図-1に示す。

表-1 各テーマに対する達成目標

テーマ	達成目標
1. レーザー打音検査装置による計測方法の高速化技術の開発	レーザー打音検査装置の計測時間短縮、計測範囲の位置情報の精度向上を実現するための技術開発。
2. レーザー打音検査装置の橋梁構造物点検に向けた改良	適用可能範囲を30m以上に拡大、その技術を適用した橋梁点検用長距離レーザー打音検査装置の開発。
3. レーザー打音検査装置への複数の状態の異なるうき・剥離の検出能力付与	複数の状態の異なる供試体を製作し、うき・剥離の検出能力の確認。さらに、実構造物で点検技術者が行う打音検査との比較検証による検出能力の確認。
4. 継続的な観察や措置に役立つ記録様式と診断支援となる閾値や評価方法の構築	複数の状態の異なるうき・剥離と、レーザー打音により取得される変位の波形異常を関係付け、レベルⅠ～Ⅲの分類が可能な評価方法の提案。

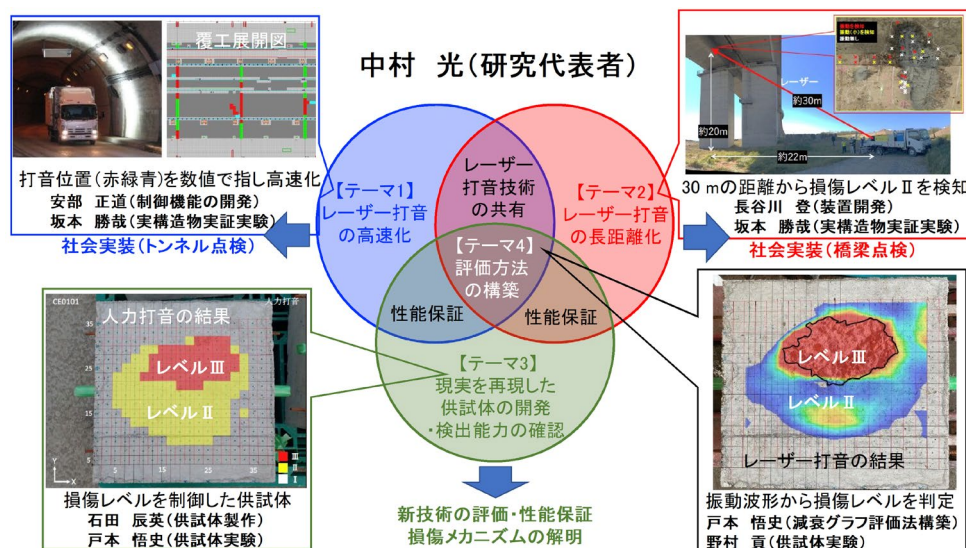


図-1 各テーマの相関図と各研究者の役割

【テーマ1】の研究過程と目標達成状況

- レーザー打音検査装置の計測時間は、これまで人力打音検査時間の約4.2倍掛かっていたが、障害物やひび割れのAI抽出手法結果と組み合わせることで、自動化による計測準備時間短縮、照射範囲適正化による計測範囲縮小を実現する制御機能を開発し、約2.2倍まで短縮した。

【テーマ2】の研究過程と目標達成状況

- 可搬型長距離レーザー打音検査装置を開発した。橋梁実構造物の欠陥検知試験では、距離30m、入射角45度の条件下で、点検技術者がレベルⅡと判定した欠陥の検知に成功した。

【テーマ3】の研究過程と目標達成状況

- ・ 短期間に状態の異なるうき・剥離を模した供試体を作成する方法を考案し、多数の損傷供試体の試験から、レベルⅠ～Ⅲのうき・剥離の検出が可能なことを確認した。また、道路橋、道路トンネルの実構造物で点検技術者がレベルⅡと判定した範囲の検知に成功した。

【テーマ4】の研究過程と目標達成状況

- ・ レベルⅡとレベルⅢを分離する新しい評価方法として、減衰波形の減衰過程に着目した「正規化波形エネルギー積算値曲線」を用いた「減衰グラフ評価法」を立案した。

⑦中間・FS評価で指摘を受けた事項への対応状況

○レーザー打音と従来打音との比較と検証を実構造物の剥離で行うことの前提として、レーザー打音の測定条件や検出範囲などを明確にしていきたい。

- ・ トンネルの目地部周辺において、人力打音で確認された幅約50mmの欠陥を対象とし、欠陥検知に必要な打点間隔を検討した結果、50mmを越えると人力打音結果のうき範囲(U)を検出できないことが判明した。このため、レーザー打音検査装置の照射ピッチは、欠陥の幅と同程度以下の計測間隔が必要であることが必要であり、トンネル目地部周辺の照射ピッチは30mmを基準値として提案した。
- ・ 橋梁床版の深さ5cm以内のうき・剥離を模擬した供試体について、人力打音検査結果と比較検証した。その結果、人力打音検査がレベルⅢ（叩き落としが必要）と診断した範囲はレーザー打音検査装置の評価と良く整合し、かつ、石刀ハンマーにより叩き落とせることを確認した。

○無筋コンクリートを対象とした技術の検証や適用性評価について具体的に示していく必要がある。また、従来の非破壊検査技術では検出が困難である目地部のうき・剥離に対する技術の検証や適用性評価を行っていくのがよい。

- ・ 覆工打設時のセントル押し付け圧などにより目地部に発生するひび割れを再現した隅角部供試体実験の結果、浅い深度における半円状の貫通ひび割れの検出に対する適用性を確認した。
- ・ 実際の覆工目地部の損傷度を評価した結果、図-2に示すように従来の人力打音検査によりうき「U」と判定された範囲と良く整合し、目地部での適用性を確認した。

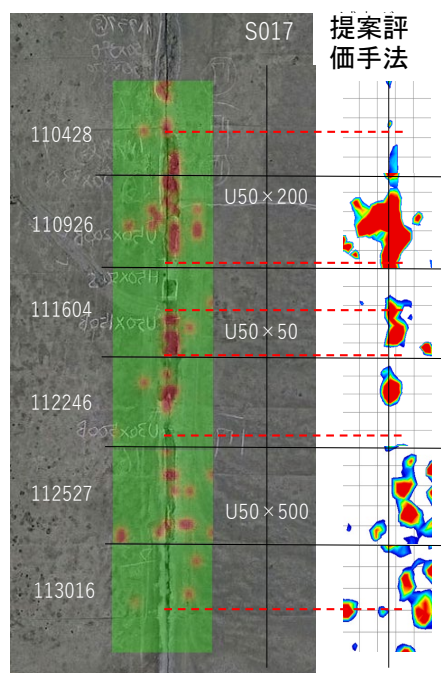


図-2 道路トンネル実構造物目地部における検出範囲の検証

⑧研究成果

【テーマ1】レーザー打音検査装置による計測方法の高速化技術の開発

- ・障害物のAI抽出開発は、障害物画像をベースにした約5万個の深層学習により、MIMM取得画像の障害物を90%以上の抽出率で自動抽出できる事を確認した。トンネル実構造物実証実験の結果は、障害物抽出率は90%以上、ひび割れ抽出率80%以上となる。
- ・ひび割れ密集範囲のAI抽出開発は、AI抽出したひび割れ密集範囲の密度や交差数から、剥離につながる危険度スコア計算の処理ロジックを構築した。トンネル実構造物実証実験では、ひび割れ密集目地部への打音範囲絞り込みと適切な打音ピッチ設定に成功した。
- ・障害物ならびにひび割れの密集範囲のAI抽出から、打音範囲を図-3に示すように図化するとともに、3次元座標データとすることを可能にした。
- ・打音位置の情報を伝送する制御装置開発は、MIMM画像取得位置とレーザー照射位置の差分補正も行いレーザー打音検査装置へ座標伝送に成功した。
- ・座標指示による計測準備時間短縮、照射範囲の適正化による計測範囲縮小により、従来の人力打音検査時間の4.2倍掛かっていた計測時間は約2.2倍まで短縮した。

■学内外等へのインパクト

- ・開発した障害物抽出AI、ひび割れ抽出AIは、MIMM取得画像に限らず、ドローン等で取得した画像にも活用可能である。トンネル内の施設に着目したAI抽出技術は、これまで開発されていないことから、例えば跨線橋など附属施設への干渉を防ぐ必要のある遠隔点検技術への活用が期待される。

【テーマ2】レーザー打音検査装置の橋梁構造物点検に向けた改良

- ・ロングレンジ化の技術開発は、供試体を用いた性能評価において、深さ10mm欠陥（距離40m・入射角60度）、深さ30mm欠陥（距離40m・入射角45度）の検知に成功した。
- ・可搬型長距離レーザー打音検査装置を開発し、図-4に示す橋梁実構造物の欠陥検知試験では、距離30m・入射角45度の条件下で、点検技術者がレベルⅡと判定した欠陥の検知に成功した。

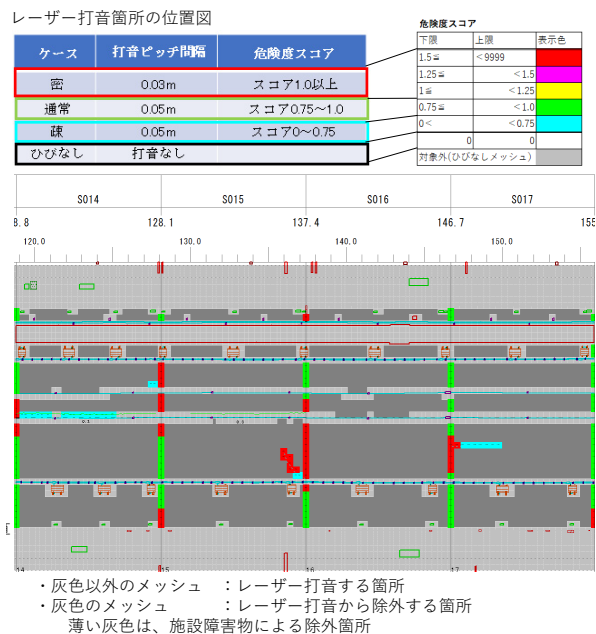
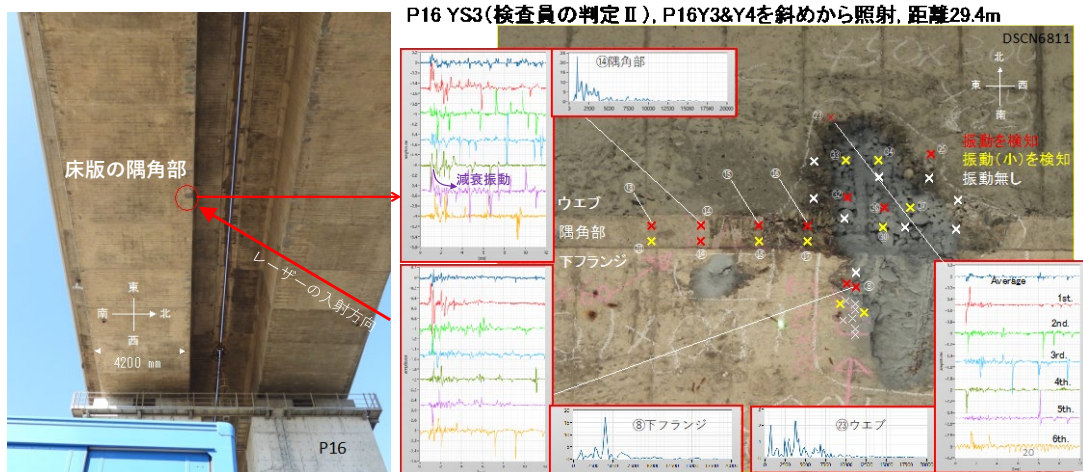


図-3 トンネル実構造物実証実験に基づく打音範囲結果



検査員の判定Ⅱの欠陥で共振振動(欠陥判定)を検知。(距離約30m、入射角45°)

図-4 橋梁実構造物における検査範囲拡大図

■学内外等へのインパクト

- ・距離30mの長距離レーザー打音検査装置を世界で初めて開発に成功した。下部工高さ25m程度までの適用が可能となり、例えば中部地方整備局が管理する橋梁の約97%をカバーすることができると考えられる。また、高所作業車の設置が難しい誇道橋や跨線橋に、地上からの打音点検を行うことが可能になり、安全性の向上に大きく貢献できる。

【テーマ3】レーザー打音検査装置への複数の状態の異なるうき・剝離の検出能力付与

- ・状態の異なるうき・剝離を模した供試体を静的破砕剤により内部膨張圧を与えて短期に作成する方法を立案した。この方法により、各種ひび割れ形態に対し、電食試験と同様かつ電食試験では再現が困難な大きな損傷までを含む各種損傷レベル(レベルⅡ:要注意、レベルⅢ:直ちに措置が必要)の再現に成功した(図-5)。

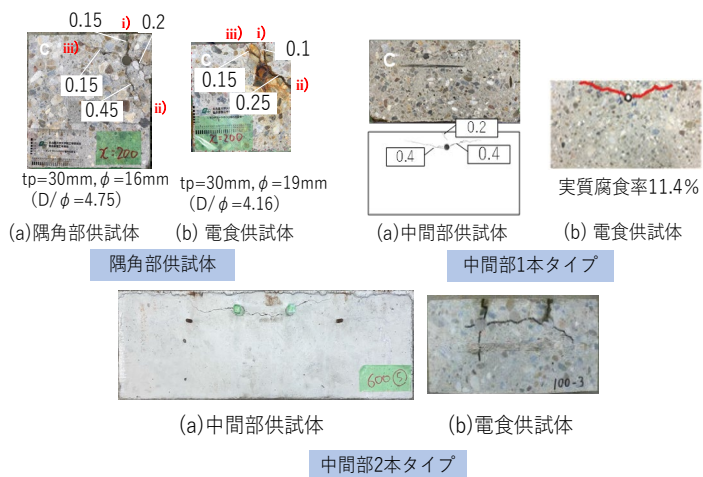


図-5 静的破砕剤を用いた模擬ひび割れ例

- ・28供試体に対し、①レーザー打音、②点検技術者、③AI打音チェック、④鋼球落下試験、による欠陥判定、⑤人力叩落とし、⑥供試体切断、による内部損傷の確認を行い(図-6)、レーザー打音によりレベルⅠ～Ⅲのうき・剝離の検出が可能なることを確認した。
- ・実構造物での点検技術者との比較検証は、トンネル点検の高速化、橋梁点検の遠距離化を図った状態においても、点検技術者がレベルⅡと判定した範囲の検知に成功した。

■学内外等へのインパクト

- 本研究で開発した静的破砕剤を用いた模擬腐食ひび割れの生成方法は、異なる損傷度を有する供試体を簡単に作成し、打音検査の検証や指標作成、AIの教師データの取得用供試体にも有用と考えられる。

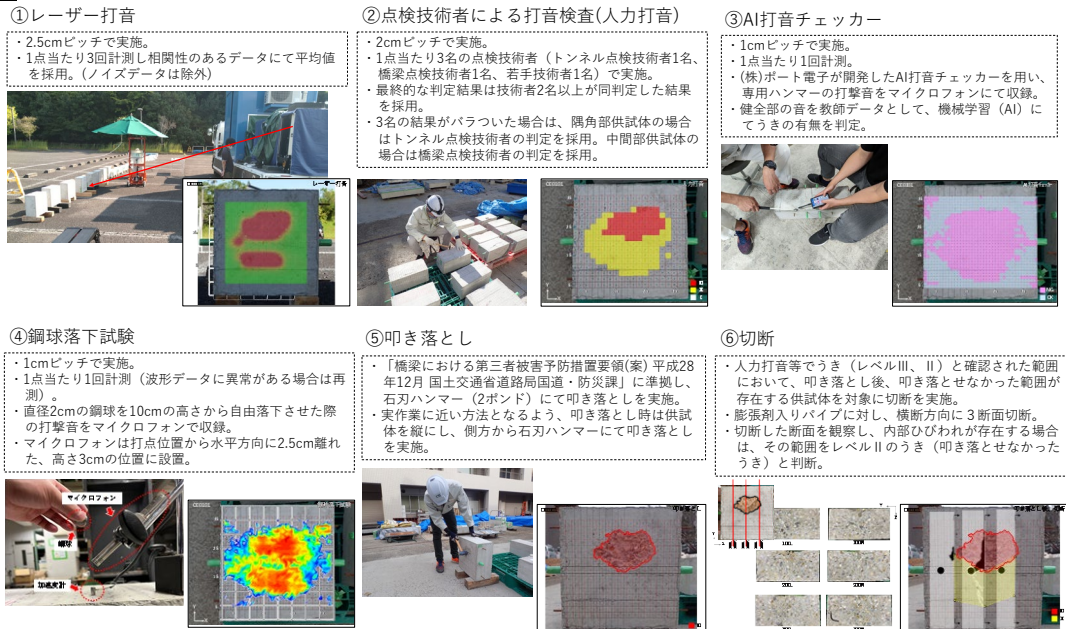


図-6 供試体実験状況

【テーマ4】継続的な観察や措置に役立つ記録様式と診断支援となる閾値や評価方法の構築

- 打音結果の評価で一般に用いられる、スペクトルのピーク強度や面積を指標とした方法では、欠陥範囲の特定は可能であったが、損傷度の違いを区分する明確な傾向が確認できなかった。そのため、レベルIIとレベ

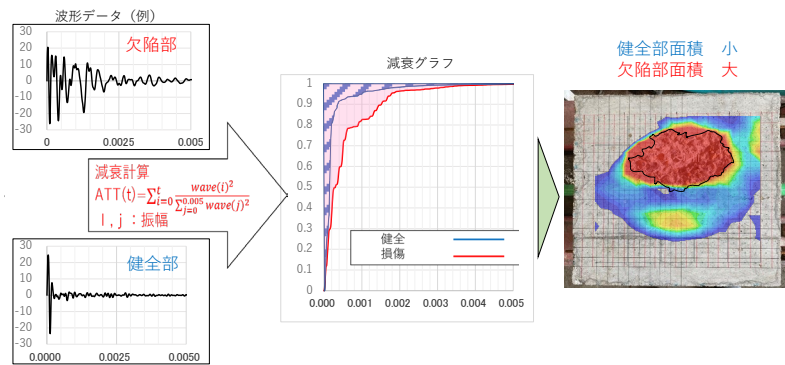


図-7 正規化波形エネルギー積算値曲線を用いた評価法

- ルIIIを分離する新しい評価方法として、図-7に示すような減衰波形の減衰過程に着目した「正規化波形エネルギー積算値曲線」を用いた「減衰グラフ評価法」を立案した。
- 本評価法を用いた供試体実験の結果、レベルIIとレベルIIIの検知範囲は、人力打音検査結果、供試体切断面と良く整合したことから、レベルIIとレベルIIIを区分できる可能性があること、また、人力打音と同様な範囲表示が可能であることが示された。

■学内外等へのインパクト

- 減衰グラフ評価法は、打撃エネルギーの大きさや環境振動の影響を受けにくいため、レーザー打音検査装置だけでなく、鋼球落下試験など、他の励起方法にも適用可能である。

⑨研究成果の発表状況

●知財

・建設技術研究所, 名古屋大学, 量子科学技術研究開発機構: 損傷評価装置及び損傷評価用プログラム, 特許申請予定

●学術論文(査読有り)

・長谷川登, 岡田大, 近藤修司, 北村俊幸, 錦野将元, 坂本勝哉, 木暮繁: トンネル覆工コンクリートのうき検知を遠隔で行うレーザー打音検査装置の現状と社会実装について, 計測と制御, VOL.60, No11, pp.765-769, 2021.

・戸本悟史, 長谷川登, 岡田大, 近藤修司, 北村俊幸, 錦野将元, 中村光: ラスター(格子状)スキャン機能を有するレーザー打音検査装置を用いたトンネル覆工コンクリートの診断支援技術の高度化に関する研究, 構造工学論文集, Vol.68A, pp.671-684, 2022.

・中村光, 戸本悟史, 松永輝, 杉山風雅, 三浦泰人, 辻健斗: 静的破砕剤による各種形態と損傷度を有する模擬腐食ひび割れの生成法の提案, 構造工学論文集, 69A, pp.718-733, 2023.

・長谷川 登, 錦野 将元, 岡田 大, 近藤 修司, 坂本 勝哉, 木暮 繁, 安倍 正道, 戸本 悟史, 中村 光: ジュール級パルスレーザーによるインフラ先進診断 -レーザー打音法-, レーザー研究, Vol. 51, 9号, 2023, accepted.

●学術論文(査読無し)

・戸本悟史, 藤崎能正, 長谷川登, 北村俊幸: レーザー打音検査装置による浮き・はく離のデータ化への挑戦 人の手に頼らないトンネル診断技術の開発, 土木施工, vol.67, No.7, pp.84-87, 2021

・坂本勝哉, 木暮繁, 錦野将元, 岡田大, 近藤修司, 北村俊幸, 長谷川登: 高強度レーザーを利用したインフラ点検技術の社会実装, 光アイアンス 2021年12月号, pp.38-43, 2021

・長谷川登, 錦野将元, 岡田大, 近藤修司, 北村俊幸, 坂本勝哉, 舩添和久, 木暮繁: コンクリートの中の見えない欠陥をレーザーで検知 -レーザー打音検査装置-, オプトロニクス 2022年8月号, pp.83-89.

・杉山風雅, 松永輝, 中村光, 三浦泰人: 鋼球落下試験による模擬内部腐食ひび割れの領域と損傷度の判定, 土木学会中部支部研究発表会概要集, 2022年3月

・松永輝, 杉山風雅, 中村光, 三浦泰人: 静的破砕剤を用いた模擬腐食ひび割れの生成法, 土木学会中部支部研究発表会概要集, 2022年3月

⑩研究成果の社会への情報発信

●国土交通省点検支援技術性能カタログ(年度毎に登録内容を更新)

株式会社フォトンラボ(QST 認定・理研ベンチャー): レーザー打音検査装置, 非破壊検査技術(トンネル), 技術番号 TN020003-V0323, 2023/3/31.

株式会社フォトンラボ(QST 認定・理研ベンチャー)・建設技術研究所・計測検査: レーザー打音検査装置非破壊検査技術(橋梁), 技術番号 BR020016-V0223, 2023/3/31.

●講演

- ・Noboru Hasegawa: Development of remote inspection system for the bridge concrete using high power lasers, Laser Solutions for Space and the Earth 2023, Yokohama, Japan, 2023/4/21.(招待講演)
- ・Noboru Hasegawa: Development of a laser hammering system for tunnel and bridge concrete inspection using the high-power lasers, Q-Basis, Osaka, Japan, 2023/4/24.(招待講演)

●公開実験

- ・公開実証実験(MIMM+レーザー打音)-静岡, 静岡県焼津市浜当目トンネル, 2022/09/06
参加者 120 名以上, 建設通信新聞で紹介
- ・公開実証実験(MIMM+レーザー打音)-山梨, 山梨県山梨市広瀬トンネル, 2022/10/18
参加者 40 名以上, NHK 山梨, NHK 総合, TBS, 山梨放送, 読売新聞, 日日新聞, 毎日新聞, 共同通信, 中部経済新聞で紹介

●プレスリリース

- ・建設技術研究所, フォトンラボ, 量子科学技術研究開発機構: ~人の手に頼らないロボット点検技術のイノベーション~ 「レーザー打音検査装置」のタイルパネル診断支援への拡大, 2023/3/28.
- ・建設技術研究所, フォトンラボ, 量子科学技術研究開発機構: ~人の手に頼らないロボット点検技術のイノベーション~道路橋のレーザー打音検査によるリモート検査の実証実験, 2023 年 5 月 30 日プレスリリース予定

●報道(新聞、テレビ)

- ・2022 年 1 月 16 日:遠隔操作ロボットにレーザー光、人の技も 災害に備えインフラを守る, 朝日新聞.
- ・2022 年 10 月 18 日: 笹子トンネル事故 10 年を前に最新技術で設備損傷の点検公開, NHK 山梨県のニュース.
- ・2022 年 10 月 18 日: デジタル技術で“熟練の打音検査” AI が分析 トンネル点検の最新技術を実証実験 中央道・笹子事故を受け開発, TBS Newsbig.
- ・2022 年 10 月 18 日: トンネル点検に AI 技術活用 実証実験を公開, YBS 山梨放送.
- ・2022 年 10 月 19 日: トンネル壁損傷 レーザーで点検 理研が実証実験, 読売新聞.
- ・2022 年 10 月 19 日: レーザー打音 AI 判定, 日刊工業新聞.
- ・2022 年 10 月 19 日: レーザーでトンネル点検 理研など山梨市で実証実験, 山梨日日新聞
- ・2022 年 12 月 1 日: 山梨で実証実験 笹子事故を教訓にレーザーとAI駆使 トンネルの異常発見, 中部経済新聞(共同通信配信).
- ・2022 年 12 月 1 日: 中央道笹子トンネル事故 10 年 インフラ老朽化対策をどう進める, ニュースウォッチ 9, NHK 総合テレビ.
- ・2023 年 4 月 10 日: 建設技術研究所、レーザーでトンネル検査 作業負担軽く, 日本経済新聞
その他 20 件、計 30 件

⑪研究の今後の課題・展望等

【テーマ1】レーザー打音検査装置による計測方法の高速化技術の開発

- ・トンネル構造物実証実験では、一部範囲において指示座標に対するレーザー照射位置の誤差が十数cmほど生じている。これらの課題に対し、レーザー照射の相対位置の調整、装置位置の自動計測技術を開発することにより、照射位置の精度向上と人力打音検査装置の1.2倍までの短縮が期待できる。

【テーマ2】レーザー打音検査装置の橋梁構造物点検に向けた改良

- ・車の通行や風などの外力による橋梁自体の振動が、振動スペクトルに大きな影響を与える場合があることが明らかとなった。橋梁自体の振動と区別可能な評価法を検討することで、打音に関わる手法全般に対し、定量的評価の精度向上と適用性拡大のための知見を与えられる。
- ・トンネルと同様、面的に照射できるラスタースキャン機能へ改良するとともに、広範囲の照射が可能となる仕様を検討していく必要がある。これにより、トンネルより距離がある橋梁下面などに対し、より高速かつ安全な打音検査が可能になる。

【テーマ3】レーザー打音検査装置への複数の状態の異なるうき・剥離の検出能力付与

- ・隅角部供試体は、レベルⅡのうきを再現できた供試体が十分ではないため、隅角部におけるレベルⅡのうきに関するデータを蓄積することが重要である。

【テーマ4】継続的な観察や措置に役立つ記録様式と診断支援となる閾値や評価方法の構築

- ・コンクリート面に対して平行に面的な広がりをもつ損傷の場合、たわみ共振による共鳴振動が生じやすく内部の損傷評価は比較的容易であることを確認し、部材端部を除く鉄筋腐食による内部ひび割れの検知能力は高く、腐食コンクリート構造物全般への適用が期待される。

⑫研究成果の道路行政への反映

(1)点検支援技術の活用促進

- ・レーザー打音検査装置は、走行画像取得装置により事前に取得された画像データとの情報連携により、計測時間の高速化が実現した。また、更なる高速化に必要な開発内容についても道筋を示した。点検支援技術として広く社会普及できる可能性が高いことを示した。

(2)維持管理サイクルの高度化

- ・レーザー打音検査装置の社会普及が進めば、コンクリート構造物のうき・剥離の状態をコンクリート表面の振動値という定量的なデータで記録することが容易となる。その結果、点検の範疇を超え、うき・剥離等の定量的データに基づくリスク判断を行う診断支援、劣化進行度の評価、正確な位置情報の取得を実現することができる。これにより、情報の取得（知覚系）と分析（判断系）の技術導入によるデジタルツインの活用、点検・診断データのCIMへの導入等、維持管理サイクルの高度化が期待できる。

(3)将来の点検技術者不足への対応

- ・レーザー打音検査装置は、本研究の成果を用いて点検現場におけるレーザー照査範囲の設定から計測値による診断までの一連のプロセスを自動化することができれば、経験の浅い点検技術者でも容易に操作が可能となる。これにより、今後、熟練技術者が不足すると考えられる建設コンサルタント会社や、専門的な点検技術者のいない道路管理者等での使用が可能となり、将来の点検技術者不足に対応することができる。

(4) デジタル田園都市国家構想への貢献

- ・本研究により開発した技術により、維持管理の高度化、点検作業の省力化が可能になれば、持続可能な環境・社会・経済の基盤となる交通インフラを効率的に維持することができる。また、肉体的な負担の大きい点検作業から技術者を解放し、心ゆたかな暮らしにつながる知的生産へシフトすることが期待できる。

⑬自己評価

①レーザー打音検査装置の高速化、②ロングレンジ化、③静的破砕剤を用いた供試体製作、④複数の状態のうき・剥離を再現した供試体実験により減衰グラフ評価法の立案、⑤レベルⅡとレベルⅢを判定、⑥実構造物で点検技術者と同様の判断が出来る確認、など当初予定を超える研究成果を得ることができた。これらの成果は数多くの学术论文に掲載された。また、実構造物での実証実験も行い、実務での適用性を確認するとともに課題も明確にし、道路政策の質の向上にも寄与する成果を示した。さらに、公開実験、講演などとともに多数のマスコミにレーザー打音技術が取り上げられ、インフラメンテナンスの重要性と、新技術の開発・実装の必要性を幅広く社会に伝えることにも寄与した。

以上より、開発面、学術面の両面において研究成果は高く、さらに社会的側面での貢献も大きいと考えており、本研究開発は当初想定の100%以上を達成したといえる。