

道路政策の質の向上に資する技術研究開発  
成 果 報 告 レ ポ ー ト  
N o . 2021-5

研究テーマ

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

研究代表者：名古屋大学大学院教授 中村 光

令和 5 年 5 月

新道路技術会議

# 目次

研究概要（様式 3 を挿入） .....	1
第 1 章 研究概要 .....	3
1. 1 はじめに .....	3
1. 2 研究の検討課題 .....	3
1. 3 研究の概要 .....	4
第 2 章 レーザー打音検査装置による計測の高速化検討 .....	6
2. 1 研究の目的 .....	6
2. 2 研究の概要 .....	6
2. 3 障害物の位置情報データを自動で抽出するソフトウェアの開発 .....	7
2. 4 ひび割れ密集範囲等の位置情報データを自動で抽出するソフトウェアの開発 .....	8
2. 5 レーザー打音ピッチを自動で設定するソフトウェアの開発 .....	10
2. 6 ソフトウェアからの情報を伝送できる制御装置の開発 .....	11
2. 7 トンネル内施設に対する誤差量の決定方法 .....	12
2. 8 トンネル実証実験 .....	12
2. 9 研究成果 .....	13
2. 10 申し送り事項 .....	14
第 3 章 レーザー打音検査装置の橋梁構造物点検に向けた改良 .....	15
3. 1 研究の目的 .....	15
3. 2 ロングレンジ化距離の目標設定 .....	15
3. 3 研究の概要 .....	16
3. 4 振動励起用レーザーのロングレンジ化 .....	16
3. 5 振動測定用レーザーのロングレンジ化 .....	18
3. 6 長距離レーザー打音検査装置の開発 .....	18
3. 7 橋梁構造物での欠陥検知試験 .....	19
3. 8 研究成果 .....	20
3. 9 申し送り事項 .....	21

第4章	レーザー打音検査装置への複数の状態の異なるうき・剥離の検出能力追加検討	22
4.1	研究の目的	22
4.2	研究の概要	22
4.3	状態の異なるうき・剥離を模した供試体の製作	22
4.4	室内実験に基づく状態の異なるうき・剥離の波形異常の分析と評価検証	24
4.5	実構造物におけるレーザー打音と点検技術者による打音検査との比較検証	26
4.6	申し送り事項	28
第5章	診断支援となる閾値や評価方法、記録様式の構築	29
5.1	研究の目的	29
5.2	研究の概要	29
5.3	文献調査	29
5.4	閾値と評価方法の構築の検討方針	29
5.5	従来手法による閾値と評価方法の構築	30
5.6	本研究で構築した閾値と評価方法	33
5.7	記録様式の検討	40
5.8	点検業務への導入に向けた手順・指針を作成するための基礎資料とりまとめ	42
第6章	道路管理者等との意見交換	45
6.1	目的	45
6.2	概要	45
6.3	レーザー打音検査装置の測定条件	45
6.4	レーザー打音検査装置の計測範囲	45
6.5	従来破壊検査では検出困難な目地部のうき・剥離に対する技術検証や適用性評価	46
6.6	無筋コンクリートを対象とした技術検証や適用性評価	47
6.7	現場条件に照らした運用方法や安全管理の方法	48

**「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」(令和4年度採択)  
研究概要**

番号	研究課題名	研究代表者
No.2021-5	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	名古屋大学 教授 中村 光

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。

**1. 研究の背景・目的**

橋梁、トンネル等の道路構造物へレーザー打音検査装置の適用範囲を拡大し、広く社会に普及させていくためには、1)レーザー打音検査装置の操作性向上や準備、作業時間の短縮化といった効率性向上、2)より離れた位置から検出が可能となるレーザー照射技術、3)うき・剥離に対する検出精度の向上、4)診断に必要となる定量的な情報提供等に課題がある。本研究は、この4点の課題を解決することで、レーザー打音検査装置の社会実装を大きく前進させることを目的とした。

**2. 研究内容**

【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」

計測時間は、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】「レーザー打音検査装置の橋梁構造物点検に向けた改良」

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】「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」

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ることを確認した。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。

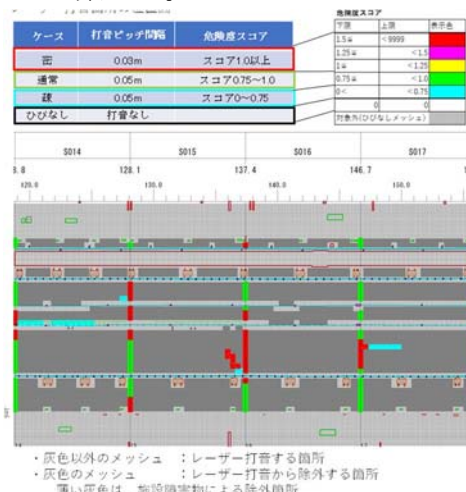
【テーマ4】「継続的な観察や措置に役立つ記録様式と診断支援となる閾値や評価方法の構築」

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。

**3. 研究成果**

【テーマ1】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。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。トンネル構造物実証実験では、図-1に示すように、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。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、計測時間の高速化を実現した。

【テーマ2】レーザー打音のロングレンジ化の技術開発を行い、供試体を用いた性能評価において、距離40m・入射角60度で深さ10mmの欠陥、距離40m・入射角45度で深さ30mmの欠陥の検知に成功した。



また、可搬型長距離レーザー打音検査装置を開発し、橋梁実構造物の欠陥検知試験では、**図-2**に示すように、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】状態の異なるうき・剥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、28 供試体に対する供試体実験を行った。

①レーザー打音、②点検技術者による打音検査、③AI 打音チェッカー、④鋼球落下試験、⑤叩き落とし、⑥切断を行い、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も適用性を確認した。

【テーマ 4】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「減衰グラフ評価法」を立案した。

また、レーザー打音の高速化により計測点間隔が広がることも想定し、面的な損傷が点で計測されることに対する面的評価法も合わせて立案した。これにより、計測結果をコンタ表示することを可能とした。レベルⅡとⅢの検知範囲は、**図-3**に示すように、人力打音検査結果、供試体切断面と整合する結果を得ることに成功した。

#### 4. 主な発表論文

- ・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（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，土木学会 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.

#### 5. 今後の展望

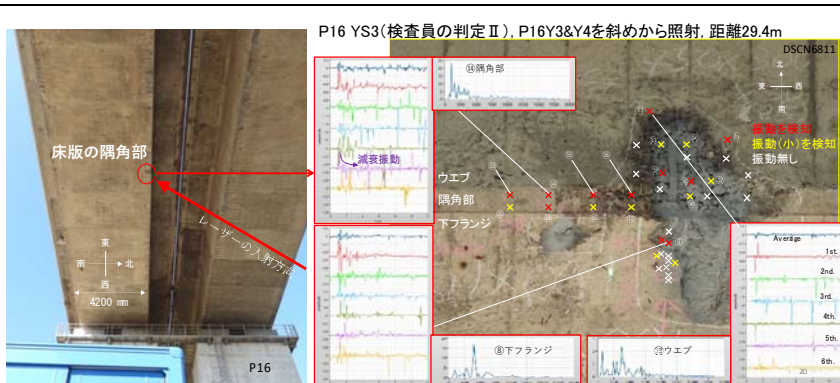
レーザー打音検査装置の社会普及が進めば、うき・剥離の状態をコンクリート表面の振動値という定量的なデータで記録することが容易となる。これにより、定量的データに基づく診断支援、劣化進行度の評価、正確な位置情報の取得を実現することができ、維持管理サイクルの高度化が期待できる。点検支援技術として広く社会普及するためには、さらなる高速化を進め、従来点検コストと同等以下までコストを圧縮することが必要である。

#### 6. 道路政策の質の向上への寄与

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、将来の点検技術者不足に対応することができる。

#### 7. ホームページ等

特になし



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

図-2 橋梁実構造物における実証実験結果

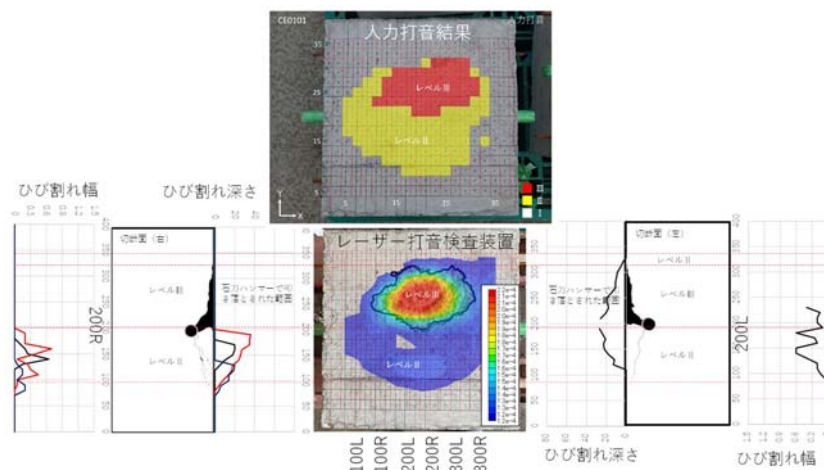


図-3 供試体を用いた人力打音検査との比較検証

# 第1章 研究概要

## 1.1 はじめに

### (1)研究の目的

コンクリート構造物のうき・剥離の検知・診断は、検査員がハンマーで直接叩いて確認する打音検査が広く普及しているが、高所での危険を伴う作業であり、判定の良否は検査員の技量に左右される。また、損傷の程度や位置の記録はスケッチや局所的な画像データしか残らず判定自体が客観的なデータに基づくものとなっていない。このため、継続的な監視、前回点検時からの劣化進行度の評価、補修、補強設計の際に必要な位置、寸法、損傷程度が組み合わされた情報の精度が低くならざるを得ず、それらの実施が非効率なものとなっている。

交通インフラの定期点検では、効率的で持続可能な点検、維持管理の実現を目標とし、主たる検査手法である近接目視と打音検査をロボット化により支援しようとする取り組みが進められている<sup>14)</sup>。特にうき・剥離の主要な診断技術である打音検査を支援する技術として、レーザー打音検査の研究が進められ、レーザーの打撃力によるコンクリート表面の微小な変位を計測することで、内部欠陥等の異常検出が遠隔で可能であることが示されている<sup>5)6)</sup>。

この技術を用いた図-1.1.1に示すレーザー打音検査装置は、トンネルの点検支援技術カタログ<sup>7)</sup>に掲載され、トンネル点検分野において社会実装が進んでいるが、異常検知に留まっており診断を支援することは出来ない。また、計測時間の短縮といった課題も明らかになってきている。一方、橋梁の打音検査は、打音可能な飛行ロボットも開発はされているが<sup>8)9)</sup>、現状は点検員による点検に限られており、橋梁点検車や高所作業車の小さなバケットから体を伸ばしたギリギリの姿勢での作業や、ロープによる点検箇所への近接など、危険な高所での作業も行われ、不安定な箇所を確実にたたき落とすことに力点が置かれていることもあり、記録の精度に課題がある。

橋梁、トンネル等の道路構造物に適用範囲を拡大し広く社会に普及させていくためには、1)レーザー打音検査装置の操作性向上や準備、作業時間の短縮化といった効率性向上、2)より離れた位置から検出が可能となるレーザー照射技術、3)うき・剥離に対する検出精度の向上、4)診断に必要な定量的な情報提供等に課題があることが明らかとなっている。これらの課題に対し、1)診断に必要なレーザー打音範囲とピッチの設定、レーザー打音検査に障害となる範囲を検出する作業を自動化することによる高速

化、2)高架橋や広幅員の橋梁等を地表面から打音するためのレーザーのロングレンジ化、3)様々な状態のうき・剥離に対する検出性能の向上、4)「i.すぐに叩き落とさなければならぬ危険なうき・剥離」、「ii.経過観察でよいうき・剥離」、「iii.うき・剥離の無い部位」を分類し、客観性のある計測データとして可視化、記録する、などの解決策を開発することで、従来点検と同等以上の品質と効率性、作業の安全性の確保を実現することが可能となる。

本研究は、この4点に着目し、課題の解決を図ることでレーザー打音検査装置の社会実装を大きく前進させることを目的とする。

## 1.2 研究の検討課題

### (1) 技術のユースケースと到達点イメージ

本研究開発の項目は、1.1節で記載した4つの課題に対応した、「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」、「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」、「3)レーザー打音検査装置に複数の状態の異なるうき・剥離の検出能力を付与」、「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」の4項目に加え、レーザー打音検査装置の安全な使用等を想定した「5)道路管理者等との意見交換」とした。

この5項目について、本研究で開発する技術の点検現場におけるユースケースと将来の到達点イメージを想定し、検討課題を整理した。その結果を表-1.2.1に示す。

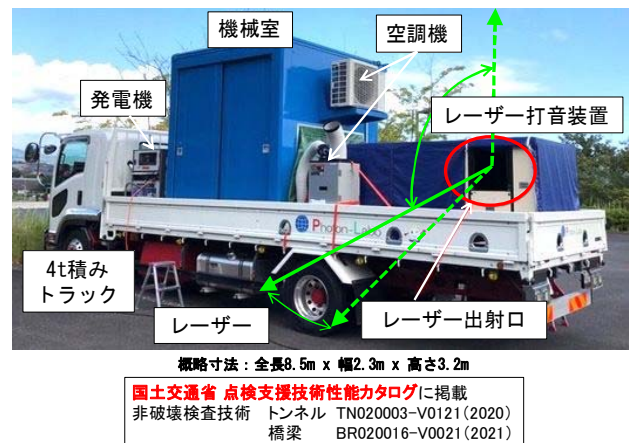


図-1.1.1 レーザー打音検査装置

表-1.2.1 技術の到達点イメージと検討課題

項目	ユースケースと将来の到達点イメージ	検討課題
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	①危険個所のスクリーニング ・構造物全体を対象にスキャン（要求精度：中） ・トンネルでは目地部、橋梁は隅角部など特定箇所に着目（要求精度：高） ②構造物全体の危険個所、措置結果の正確な記録 ・危険個所の記録に加え、叩き落とし後についても本技術を活用し、浮いていないことを確認し、位置・数量を正確に記録	【第2章】 ・画像データから、障害物施設範囲、ひび割れ密集範囲など、照射範囲に関係する位置情報を精度よくレーザー打音検査装置へ伝送する。
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	①橋梁構造物への適用 ・高さの異なる橋梁構造物に対し適用範囲が大きいロングレンジ化距離を設定 ・①を可能とするデバイス開発	【第3章】 ・適用橋梁が多くなるロングレンジ化目標距離を設定しデバイスを製作する。
3)レーザー打音検査装置に複数の状態の異なるうき・剥離の検出能力を付与	①危険個所のスクリーニング ・本技術適用後、第三者被害予防措置を実施することを前提に、安全側の評価となるように評価方法や閾値を設定 ②危険個所の正確な把握・記録 ・①に対して、見落としや過検出が無いように高精度な評価が必要 ③劣化進行の評価 ・過去と現在の振動波形の変化に基づき、うき、剥離の進行度を評価	【第4章】 ・多種多様な供試体を製作し、検出精度を向上する。  【第5章】 ・供試体実験による評価方法・閾値の確立
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	①構造物全体の危険個所を俯瞰的に記録 ・精度（位置、数量）は多少低くても3次元的に全体像を把握可能 ②構造物全体の危険個所を俯瞰的かつ正確に記録 ・高い精度（位置、数量）で3次元的に全体像を記録 ・前回点検、今回点検、第三者被害予防措置後を重ねあわせて比較	【第5章】 ・点検技術への導入に向けた手順、指針 ・現在の点検調書の改善方針
5)道路管理者等との意見交換	①レーザー打音検査装置の適用範囲 ・測定条件や計測範囲 ②覆工コンクリート目地部への適用性評価 ・無筋コンクリートへの適用性 ③安全管理 ・現道交通の安全確保	【第6章】 ・レーザー打音検査装置の測定条件と計測範囲の明確化 ・目地部への適用性検証 ・安全管理方法

### 1.3 研究の概要

#### (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による計測時間を短縮し、計測位置情報を正確に記録するためには、画像計測システムから得た画像データから、障害物施設やひび割れ密集範囲など、照射範囲に関する位置情報を精度よくレーザー打音検査装置へ伝送する必要がある。これを解決するため、以下の内容を開発した。

- ・画像から障害物施設の位置情報データを自動抽出するソフトウェアの開発
- ・ひび割れの自動抽出技術を援用した打音検査を密に実施するひび割れ密集範囲等の位置情報データを自動抽出するソフトウェアの開発
- ・様々なうき・剥離の検出精度向上に必要となるレーザー打音ピッチを自動で設定するソフトウェアの開発
- ・SIP第2期で開発中のひび割れの位置情報をレーザー打音検査装置へ伝送する技術を援用し、前記ソフトウェアからの情報を伝送できる制御装置の開発
- ・トンネル内設備の3次元的な形状等に対する誤差量の設定方法
- ・実トンネル構造物での計測時間短縮効果の確認

#### (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

ロングレンジ化目標距離は、中部地方整備局の道路管理台帳をもとに、橋梁高さを確認し、約97%への適用が可能となる「30m」に設定した。この照射距離を実現するため、以下の内容を開発した

- ・橋梁等を地表面から遠隔で計測できるロングレンジレーザー打音を実現するためのデバイスの設計、製作、既存供試体による基礎実験
- ・異なる状態のうき・剥離を再現した供試体の実験
- ・実橋梁構造物での損傷検知の確認

#### (3) レーザー打音検査装置に複数の状態の異なるうき・剥離の検出能力を付与

レーザー打音検査装置に複数の状態の異なるうき・剥離の検出能力を付与するため、供試体実験と実構造物での実証を行った。研究内容を以下に示す。

- ・様々なうき・剥離を再現する供試体を多数製作し、供試体で再現した異なる状態のうき・剥離の波形異常の取得、分析、評価
- ・実構造物に対するレーザー打音検査装置によるデータ取得と、点検技術者による打音検査について、たたき落とし後の観察による比較検証

#### (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

はじめに診断支援となる閾値や評価方法を構築し、その検討結果も踏まえながら、継続的な観察や措置に役立つ記録様式を検討した。研究内容を以下に示す。

- ・道路構造物の点検、診断技術に関する最新情報の収集、整理
- ・閾値や評価方法の構築と記録様式の検討
- ・点検業務への導入に向けた手順、指針を作成するための基礎資料のとりまとめ

#### (5) 道路管理者との意見交換

道路管理者と意見交換を行い、本研究内容へ反映するとともに、以下の内容を取りまとめた。

- ・レーザー打音検査装置の測定条件や計測範囲の明確化
- ・従来の非破壊検査技術では検出が困難となる目地部のうき、剥離に対する技術検証や適用性評価
- ・無筋コンクリートを対象とした技術検証や適用性評価
- ・現場条件に照らした適用方法や安全管理の方法

#### 参考文献

- 1) 平野逸雄, 他: トンネル覆工コンクリート打音診断機の開発, 大成建設技術センター報 Vol. 35 (2002) pp.1-4.
- 2) 東急建設株式会社: トンネル点検・診断システム iTOREL, 点検支援技術性能カタログ (トンネル), pp. 2-4-34 - 2-4-44, 令和5年3月.
- 3) 川上幸一: 赤外線熱計測による地下鉄覆工コンクリートの浮き検出方法の検討とその応用, 早稲田大学大学院 創造理工学研究科博士論文 (2019).
- 4) パシフィックコンサルタンツ株式会社: 走行型高速3Dトンネル点検システム MIMM-R, 点検支援技術性能カタログ (トンネル), pp. 2-4-45 - 2-4-55, 令和5年3月.
- 5) 西日本旅客鉄道株式会社, 公益財団法人レーザー技術総合研究所等: レーザーリモートセンシングを用いたコンクリート構造物の健全性評価技術(1)コンクリートの欠陥検出, 土木学会第69回年次学術講演会(2014年).
- 6) 保田尚俊, 島田義則, 江本茂夫, 金田道寛, 田中幸司, 武岡学, 石田信孝, 御崎哲一, 岡義晃, 桶谷栄一: 覆工コンクリートのはく落に対する健全度判定の評価指標, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.77, No.1, pp.32-43, 2021.
- 7) 国土交通省, 点検支援技術性能カタログ, 非破壊検査技術 (トンネル), pp.2-4-17, 2020.
- 8) ウォールナット株式会社: 電磁波探査ドローンによる覆工探査技術, 点検支援技術性能カタログ (トンネル), pp. 2-4-66 - 2-4-76, 令和5年3月.
- 9) 新日本非破壊検査株式会社: ドローン機能を活用した点検ロボット, 点検支援技術性能カタログ (橋梁), pp. 2-3-45 - 2-3-55, 令和5年3月.



# 第2章 レーザー打音検査装置による計測の高速化検討

## 2.1 研究の目的

トンネル点検におけるレーザー打音検査の試行的な社会実装経験によれば、通常、トンネル内における作業は環境照度としては暗く周囲の見通しが悪い。また煤や埃によりトンネル壁面の汚れで視認性が悪く、更にトンネルは同一な形状と変化の少ない様な表面状態が多い。レーザー打音検査装置の操作オペレータは、照射範囲の位置探し作業と規制内における時間的な制約など精神的負担を強いられる。また、障害物を避けたレーザー打音範囲の調整や、スクリーニングが困難なため比較的健全な部分も同一ピッチでレーザー打音を行うこと等により、点検時間が長時間化している。このため、あらかじめ取得したコンクリート表面の画像から、レーザー打音検査装置の計測において障害となる施設(照明や配線、取り付け金具等)の位置情報を自動検出するとともに、ひび割れ等の状態から、診断支援に最適なレーザー打音範囲の位置情報、打音ピッチを自動的に設定する制御方式を開発する事で、レーザー打音検査装置による計測時間の短縮を図り、計測範囲の位置情報の精度向上を図る。

## 2.2 研究の概要

図-2.2.1に示すとおり、画像計測システム(走行型トンネル点検専用車両 以下、MIMM ミーム)の画像データ取得からAI抽出し、レーザー打音装置へ必要な座標位置を伝達、レーザー打音検査の作業効率向上の開発を行った。

具体的な研究内容は、【開発1】画像からレーザー打音検査装置の障害物となる施設の位置情報データを自動で抽出するソフトウェアの開発(2.3節)、【開発2】SIP第2期で開発中のひび割れの自動抽出技術を援用した打音検査を密に実施するひび割れ密集範囲等の位置情報データを自動で抽出するソフトウェアの開発(2.4節)、【開発3】様々なうき・剥離の検出精度向上に必要となるレーザー打音ピッチを自動で設定するソフトウェアの開発(2.5節)、【開発4】SIP第2期で開発中のひび割れの位置情報をレーザー打音検査装置へ伝送する技術を援用しソフトウェアからの情報を伝送できる制御装置の開発(2.6節)、【開発5】トンネル内施設に対する誤差量の決定方法を検討(2.7節)である。

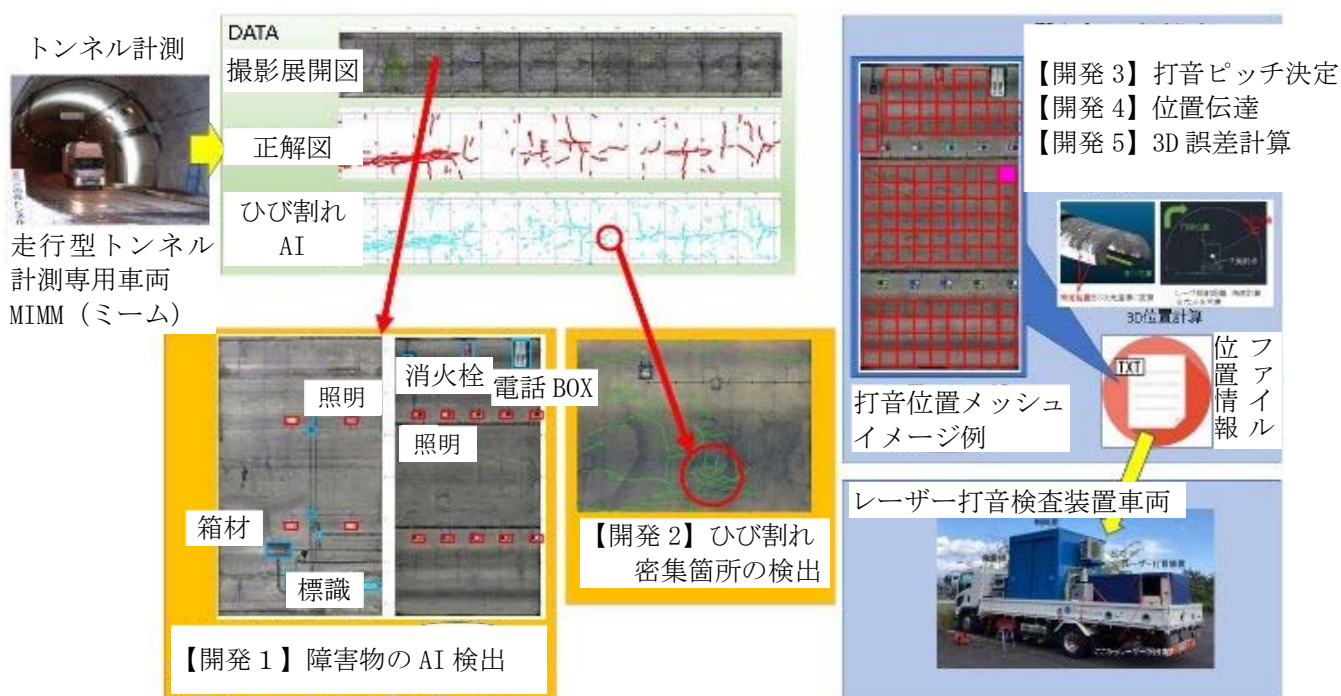


図-2.2.1 研究の概要図



整を行う事で未検出，過検出の改善が得られた。

また，ケーブルの未検出については，ケーブルを直接AI抽出する方法とケーブルの留め具をAI抽出し留め具間をケーブル推定する方法の2種類を検討した。ケーブルを直接AI抽出する方法では，細いケーブルの一部で未検出が生じる場合がある。一方ケーブル留め具の抽出では，留め具の位置がトンネル円周方向へ局所的に上下変動する場合があります。異なる位置とならない，また類似した留め具を過検出する事で位置推定が破綻するケースがあるため，直接ケーブルをAI抽出し必要に応じて補間する事とした。

内装版の抽出においては，局所的な矩形領域による蓄積学習の性質上，同一面で比較的大きな面積を占め，且つ連続的に存在する物体を抽出する事が安定さに欠けたため，画像から直接ピクセル単位にアクセスし，どのカテゴリに属するか分類する手法を試した。その結果，抽出率は70%程度に向上，一部のケースで90%を超えたが，安定的に90%以上の精度に達しない事が確認できたため，内装版については，設置している高さが比較的一定である事を考慮し，半自動処理の擬似的に高さ抽出する事で対処した。なお，塗装された内装版については，塗料であっても，塗料が剥がれる可能性があるため，レーザーを照射する事はできない。このため，内装板範囲はレーザー照射範囲から除く事で問題ない事とした。

更に，AI性能を評価するために，人を正解とした人作業自体の誤差が，どの程度なのかを把握するため，図-2.3.4の正解学習データを作成する複数名のオペレータの数値バラつき具合を確認したところ最大2.6%の差が生じる事が確認でき，正解を人にする場合において，多少の数値変動に留意する必要がある事が分かった。

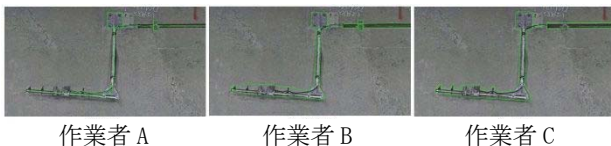


図-2.3.4 人による正解学習データの差

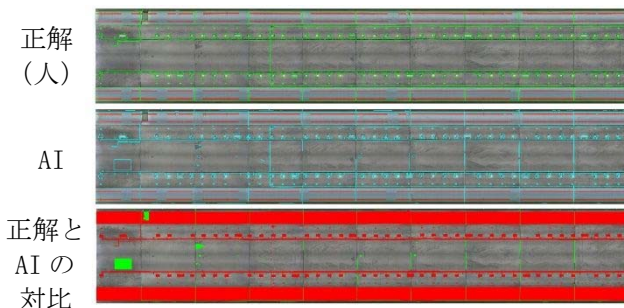


図-2.3.5 社内データでのAI抽出結果

### 再現率

正解箇所の中でAIが抽出できている割合。高いほど良い。

$$\text{再現率} = \frac{\text{的中数}}{\text{正解数}} = \frac{\text{●} + \text{●}}{\text{●} + \text{●}}$$

### 適合率

AI抽出の中で，正解を抽出している割合。高いほど良い。

$$\text{適合率} = \frac{\text{的中数}}{\text{AI数}} = \frac{\text{●} + \text{●}}{\text{●} + \text{●}}$$

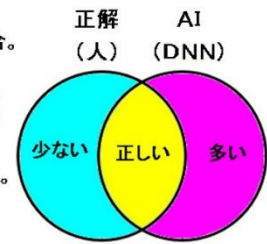


図-2.3.6 再現率と適合率

最終的には，障害物の AI 抽出率を確認するため，73 トンネル，約 56,000 個の学習データを使用した物体検出技術 AI により，図 2.3-5 の 6 トンネル平均で，再現率 95%，適合率 92% であった。再現率と適合率は，図-2.3.6 に示すとおり，正解を抽出できた割合，適合率は，AI 結果に正解がどの程度含まれているかの割合を示す。

## 2.4 ひび割れ密集範囲等の位置情報データを自動で抽出するソフトウェアの開発

ひび割れが密集している箇所は，うき・剥離などの内部欠陥が存在する可能性があるため，レーザー打音検査装置の打音間隔を狭くする事で，「i.すぐに叩き落とさなければならない危険なうき・剥離」(レベルIII)，「ii.経過観察でよいうき・剥離」(レベルII)，「iii.うき・剥離の無い部位」(レベルI)に分類する。内容としては，図-2.4.1 に示すように，展開画像からひび割れ箇所の AI 抽出を行い，図-2.4.2 に示すひび割れ密集程度に応じてランク付けを行った。メッシュ間隔の適正值を確認し，オンプレミスなソフトウェア処理を実現した。密集程度に応じたランク付けの手順(1)~(4)を以下に示す。

### (1) 画像からひび割れをAI抽出

SIP 第2 期で開発中のひび割れの自動抽出技術を援用し，ひび割れ箇所のAI抽出を行う。

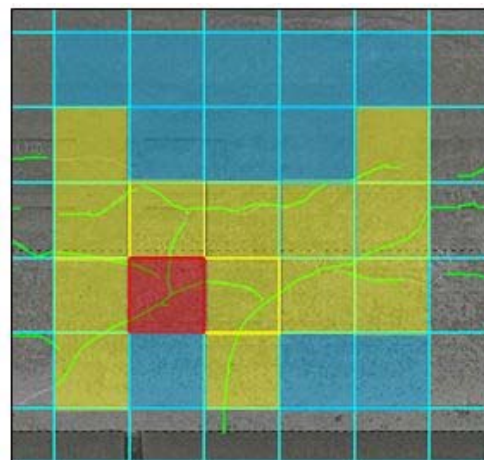


図-2.4.1 ひび割れ密集箇所の抽出イメージ

下限	上限	表示色
1.5 ≦	< 9999	赤
1.25 ≦	< 1.5	紫
1 ≦	< 1.25	黄
0.75 ≦	< 1.0	緑
0 <	< 0.75	青
対象外(ひびなしメッシュ)		

ひび割れ集中度

図-2.4.2 ひび割れ密集箇所の危険度スコア値

## (2) 横2.0m×縦2.0mのメッシュを配置

通常、道路トンネルの1スパン寸法は、車両が走行する方向(トンネル縦断方向)に10.5m、円周方向(トンネル横断方向)に約20mな事が多い。2.0mであれば進行方向に5個、円周方向に10個のメッシュを配置する事になる。図-2.4.3に示すように、トンネル点検マニュアルのひび割れ発生状況図から、「覆工スパンの中間付近」及び、「覆工スパンの天端付近」、さらに「ブロック化したひび割れ」や「亀甲状のひび割れ」の例を参考とし、かつ画像計測で得られる展開画像から変状展開図を作成し、近接目視点検でその正誤判定を行った結果を踏まえ、メッシュサイズを決定した。図-2.4.4のメッシュサイズが過大(例えば2.0m以上)であれば特定する範囲が広がるため、ひび割れを含まない箇所を多く含む事で検査効率が落ちる懸念がある。逆にサイズが過小(例えば50cm未満)であればひび割れ交差点数を確保できないため、ひび割れが密集している箇所を見逃す可能性が考えられる。更にサイズが小さい程、計算時間が自乗的に増加する事もあるため、初期設定値として2.0mを標準メッシュサイズとした。

## (3) メッシュ毎に、ひび割れの長さを集計

メッシュ毎に、ひび割れの長さ集計を行い、ひび割れ密度(長さ/面積)と、ひび割れ交差点から式(2.4.1)により、スコア値を計算した。ひび割れ交差点は、図-2.4.5の単一ひび割れの方向ベクトルを求め、ひび割れ線の接触境界まで膨張延伸し、複数線結合と交差点数のカウント処理を行った。

$$\text{スコア値} = HM / (1 + 0.2 \times HK) \quad (2.4.1)$$

HM: ひび割れ密度 (m/m<sup>2</sup>)

HK: ひび割れ交差点数

## (4) 集中度合の分類

スコア値の大きさによってメッシュの色を変え、集中度合いを表現した。

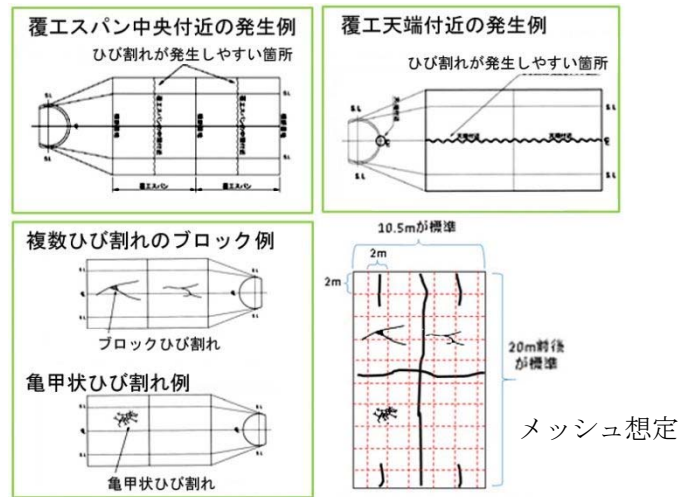


図-2.4.3 メッシュ□2.0mについて

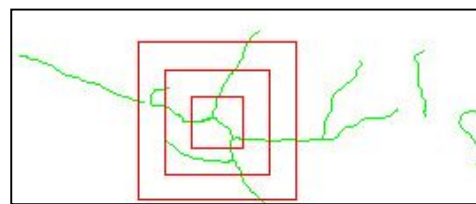


図-2.4.4 ひび割れ(緑)とメッシュサイズ(赤)の違いのイメージ

集中度を分類するための閾値の設定については、複数トンネルのひび割れ密集結果を、図-2.4.6の複数名による主観的評価を行って決定した。開発当初は、3段階の判定であったが、中央値の分類をより細かくする事で、微妙なひび割れ集中度合を区別し、危険度スコア値1.0が打音ピッチ間隔の閾値となるように、全体の点数を調整した。その結果、下記の「ひび割れ無し」を含む6段階の危険度スコア値と階層分類を設定した。

(密度小) 青→黄→赤 (密度大)

- ・白: ひび割れ無し
- ・青: スコア値 0.75 未満
- ・緑: スコア値 0.75 以上 ~ 1.00 未満
- ・黄: スコア値 1.00 以上 ~ 1.25 未満
- ・紫: スコア値 1.25 以上 ~ 1.50 未満
- ・赤: スコア値 1.50 以上

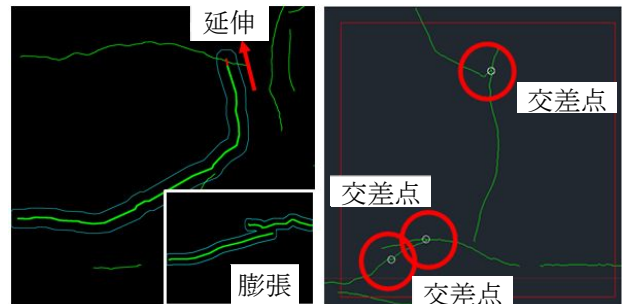


図-2.4.5 交差点計算のためひび割れ線の結合と交差点のカウント処理

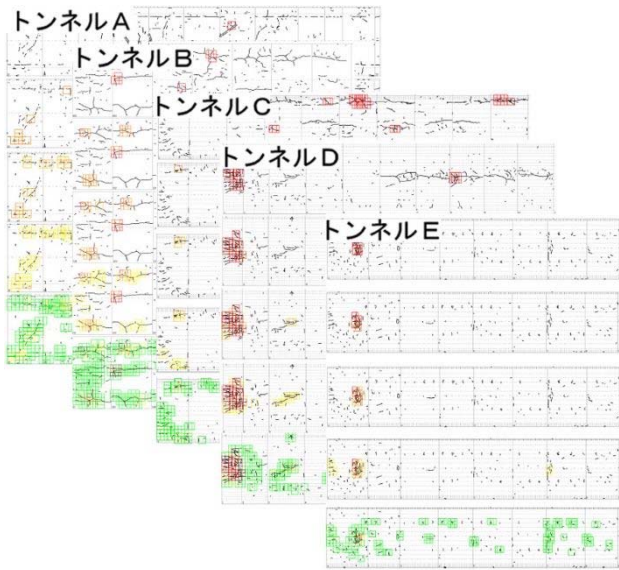


図-2.4.6 ひび割れ密集度の主観評価について

## 2.5 レーザー打音ピッチを自動で設定するソフトウェアの開発

レーザー打音ピッチ間隔を自動決定するため、判定ルールならびに処理アルゴリズムを構築した。一連の処理フローチャートを、図-2.5.1に示す。

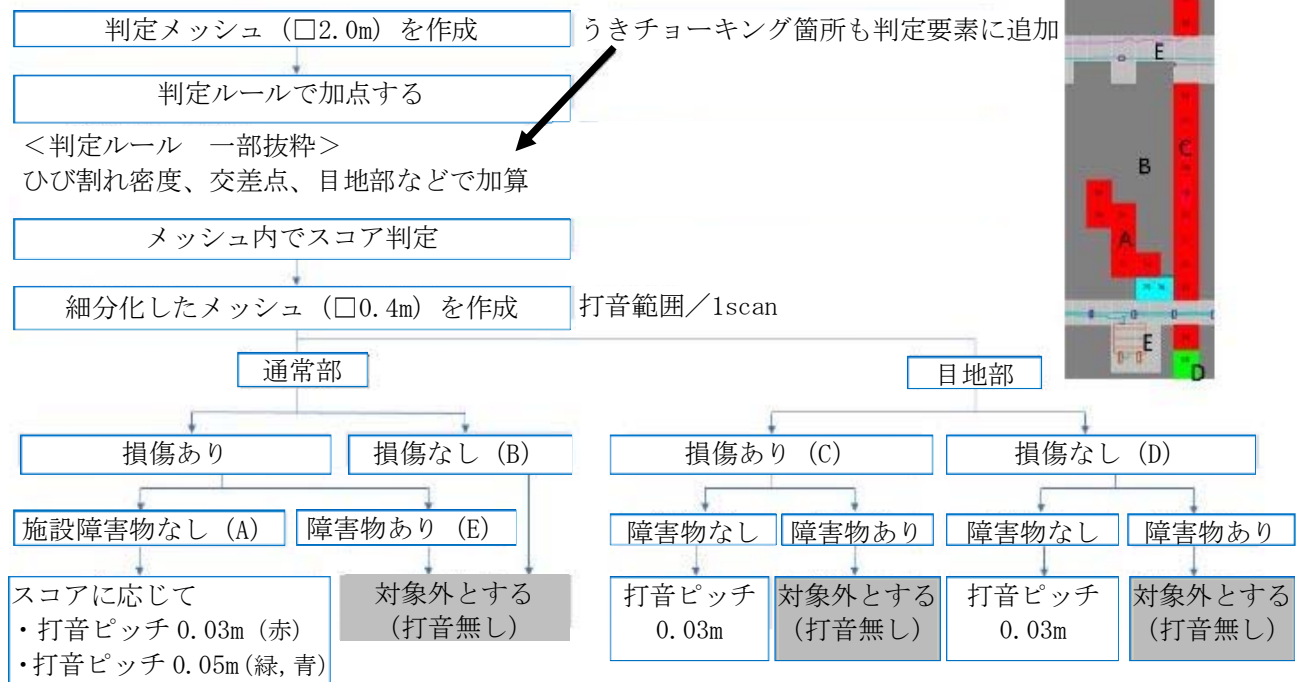


図-2.5.1 レーザー打音ピッチ間隔 決定工程

### (1) 展開画像から AI 抽出

障害物は、Mask R-CNN ベースの領域分割アルゴリズム、ひび割れは U-Net ベースの独自線検出アルゴリズムを用いてベクトルデータを出力する。この時 AI 結果に過不足があればパラメータ調整などを行う。

### (2) ひび割れの延伸・結合処理

ひび割れ交差点数の計算のため、ひび割れ線を延伸、膨張させ交差点を結合しカウントする。

### (3) 2.0m×2.0m メッシュを配置

メッシュ配置は、目地部中心と重複配置による位置調整を行っている。トンネルの1スパン毎に、メッシュを一定間隔に配置すると、スパン端部の目地部においてメッシュ範囲が同サイズにならず、端部判定に影響を与える事があるため、スパン端部をメッシュ起終点とした重複配置を行い、更に、点検で重要視される目地部が中心とするように配置改良を行った。

### (4) スコア計算

ひび割れ密度、交差点、目地部発生などの諸条件からメッシュ毎に危険度スコアを計算し、その値によってレーザー打音箇所メッシュ色を変え危険度スコアを表現した。当初のひび割れ以外のうきチョーキング箇所など、その他損傷カテゴリもSIP 第2期で開発中の技術を援用し追加した。

### (5) 細分化したメッシュ (0.4m) を作成

メッシュが小さいとひび割れ密集箇所判定漏れにつながるため、初めに $\square 2.0m$ 判定を行う。ただし $2.0m$ メッシュ範囲で出力するとひび割れのない箇所も多く含む事がある。レーザー打音範囲を絞り込み時間短縮を図るため、細分化した $\square 0.4m$ の2段階判定ロジックの組み込みを行った。

### (6) 通常部と目地部における判定ルール分類

通常部と目地部の共通ルールとして、施設障害物の存在する箇所はレーザー打音の対象外とする。目地部とは、目地を中心とした幅 $0.4m$ 範囲とし、通常部とは、目地部以外を示す。

通常部では、損傷がない場合はレーザー打音対象外とする。障害物がなく損傷がある場合、スコアに応じて打音ピッチ間隔を変更して打音箇所とする。その場合、一般的な粗骨材の大きさを想定し、**図-2.5.2**に示すように、スコア $1.0$ 以上の打音ピッチを $0.03m$ 、スコア $0\sim 1.0$ の打音ピッチを $0.05m$ とした。

目地部では、損傷があれば打音ピッチを $0.03m$ の打音箇所、通常部と異なり損傷が無い場合でも、要注意箇所とし打音ピッチを $0.05m$ の打音箇所とした。

## 2.6 ソフトウェアからの情報を伝送できる制御装置の開発

レーザー打音箇所の決定工程から得られた位置と打音ピッチ間隔情報を伝達するため座標計算を行い、特定フォーマットに出力する。画像データとMIMMに搭載しているLiDAR計測で取得された3D点群データを用いてレーザー打音検査装置に位置情報ファイルを提供する。作成手順を以下に示す。

### (1) 照射位置の計算

展開画像上でメッシュ判定されたレーザー打音位置を、2D座標の進行距離情報から3Dで該当する地点の点群を読み込み、**図-2.6.1**のMIMMの姿勢角情報を利用し、xyz成分である高さ・幅・進行方向に分解し、トンネル断面の近似線推定を行う。

ケース	打音ピッチ間隔	スコア
密	0.03m	スコア 1.0 以上
通常	0.05m	スコア 0.75~1.0
疎	0.05m	スコア 0~0.75
ひびなし	打音なし	

図-2.5.2 打音ピッチ間隔の決定

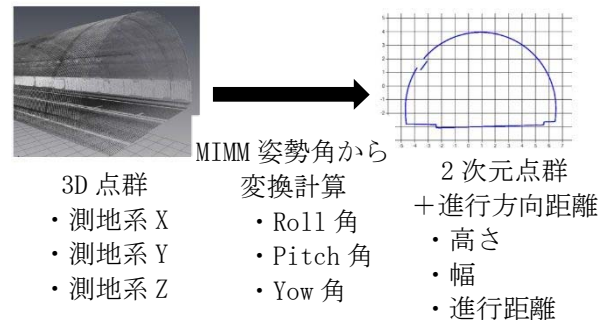


図-2.6.1 3D点群と2D点群の相互変換

次に、レーザー打音車両の走行車線を設定する。路面の点群を抽出し、路面幅の中心位置を推定する。路面幅中心から車両側面までの左右移動量を計算し車両を配置する。対面通行であれば上下線の2パターンを計算する。更に、車両タイヤ両輪に接地している点群の高さを抽出し、その高低差から車両の傾きを決定する。路面は全車線範囲で不安定に傾きが変わる可能性があるため、車両タイヤの局所的点群から傾きを計算する事とした。

上記によって得られた数値から、**図-2.6.2**のレーザー照射位置に傾き補正を行い、照射角度・幅・高さを決定した。

### (2) CSVファイル様式で出力

計算結果を、**図-2.6.3**のCSVファイル様式で出力し、レーザー打音検査装置に提供する。

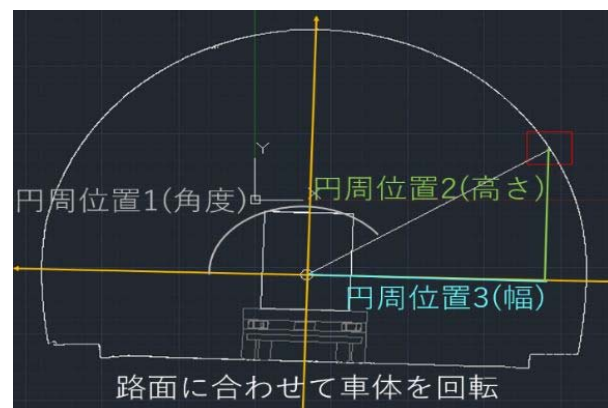


図-2.6.2 レーザー打音の座標位置計算

項目名	内容	備考
スパンID	スパン名称	
進行位置1	トンネル入り口からの距離	
進行位置2	スパン目地からの距離	スパン開始の目地を0としたときの距離
円周位置1 (角度)	レーザー照射点からレーザーを照射する角度	レーザー照射点からターゲットのメッシュ中心に照射する角度。角度は図を参照
円周位置2 (高さ)	ターゲットのレーザー照射点からの高さ(絶対値)	
円周位置3 (幅)	ターゲットのレーザー照射点からの幅(絶対値)	
優先順位	トンネル単位のひび割れ密集の優先順位	ひび割れ密集スコア上位から優先順位付けしたもの
メッシュ高さ	メッシュの高さ(円周方向)	
メッシュ幅	メッシュの幅(進行方向)	
メッシュ位置1_x	メッシュ位置1_x	画像内のメッシュ位置1のX座標
メッシュ位置2_y	メッシュ位置2_y	画像内のメッシュ位置1のY座標
メッシュ位置2_x	メッシュ位置2_x	画像内のメッシュ位置2のX座標
メッシュ位置2_y	メッシュ位置2_y	画像内のメッシュ位置2のY座標
ひび割れ密集スコア	ひび割れ密集度	メッシュ内のひび割れ密度・ひび割れ交差点・目地からスコアを加算し、密集度合いを数値化したもの
スパン優先順位	スパン単位のひび割れ密集の優先順位	
打音ピッチ間隔	メッシュ内の打音間隔距離(cm)	ひび割れ密集スコアが大きいくほど、打音ピッチ間隔が小さくなるように調整している
連番	メッシュ毎に振られた連番	進行方向・円周方向に連続している



図-2.6.3 レーザー打音装置への位置情報フォーマット

## 2.7 トンネル内施設に対する誤差量の決定方法

図-2.7.1に示すように展開画像を撮影するMIMMカメラの撮影点とレーザー打音の発射点が同一線上ではないためMIMMの指示範囲に誤差が生じる場合がある。障害物の位置は展開画像から決定されるが、ジェットファンや垂れ下がりケーブルなど壁面から離隔している障害物では、視野差の誤差影響で障害物にレーザー打音が誤照射される可能性がある。

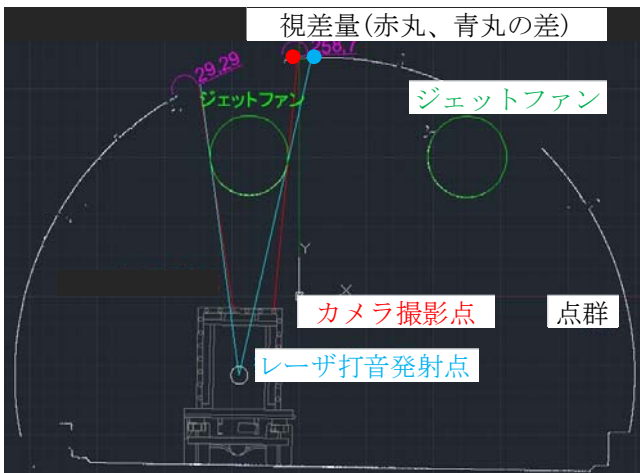


図-2.7.1 障害物の離隔による視差

なお視野差の参考値として、トンネル壁面から250mmの離隔がある障害物の視差量は25mm程度となる。ただしMIMMのカメラ配置位置による撮影方向角によって値は変動する。

対策として、MIMMのLiDAR点群より離隔障害物の断面を抽出し、MIMM車両とレーザー打音検査車両の各々走行位置を設定する。MIMM撮影点とレーザー打音発射点を断面作図し、障害物端部を通過し壁面に到達した時点の投影点差を視差量とする。メッシュ判定計算時の、障害物範囲に視差量分を膨張計算する処理ロジックを追加した。

## 2.8 トンネル実証実験

岐阜県国道156号線 図-2.8.1の名津佐トンネル(1994年完成、NATM工法、延長291m)において2022年11月24日に実証試験を行った。実証試験の1ヶ月前の2022年10月20日にMIMM計測を行いトンネル内壁の画像データ取得、LiDARデータ点群の取得を行った。その後、取得データから展開画像と3Dレーザー点群を作成した。実証では、過年度でIIa判定損傷が存在する対象スパン(15,16)の前後を含む4スパンのAI抽出率を確認し、図-2.8.2の

障害物では再現率 97%, 適合率 100%. ひび割れは再現率 80%, 適合率 44%と、障害物再現率は 90%以上を示し AI 抽出は良好であった. 危険箇所メッシュ判定も該当箇所を抽出できており問題なかった. 一方で、図-2.8.3 に示すように、MIMM からの指示座標と現地レーザー打音で確認した座標において、十数 cm ほど差が生じる箇所がある事が確認できた.  
(1メッシュ枠は□40cm)

## 2.9 研究成果

障害物の AI 抽出開発では、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 展開画像の障害物が、90%以上の抽出率で自動抽出できる事が確認できた. 実証トンネルでは、障害物の抽出率 90%以上、ひび割れの抽出率は、80%以上と精度よく AI 抽出できる事を確認した. またひび割れ密集範囲の自動抽出開発では処理ロジックを構築し、実証トンネルの両坑口に発生していたひび割れ密集箇所を抽出できており診断支援できる事を確認した.

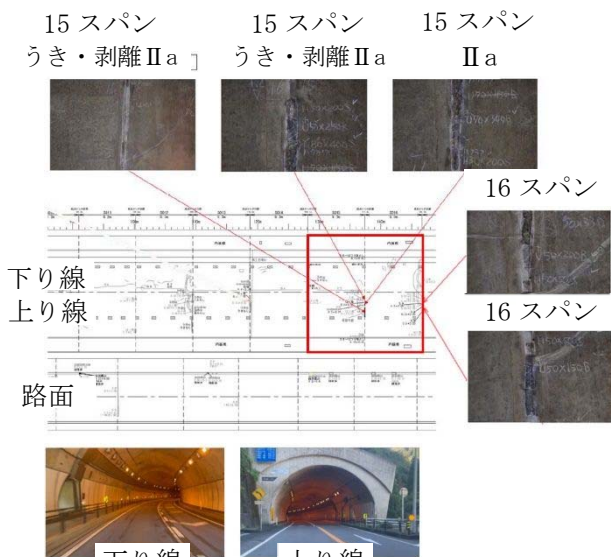


図-2.8.1 名津佐トンネルの対象スパン

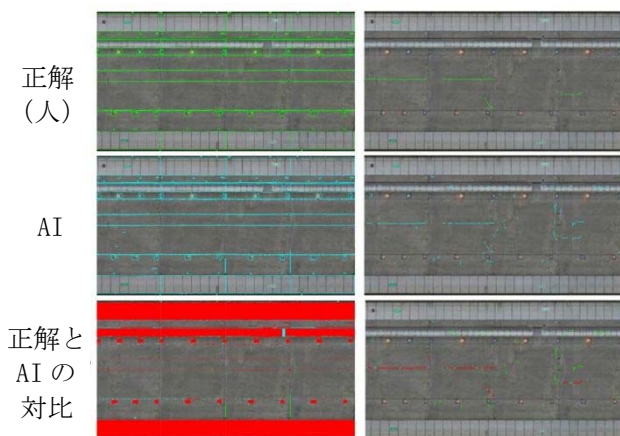


図-2.8.2 名津佐トンネルのAI抽出結果

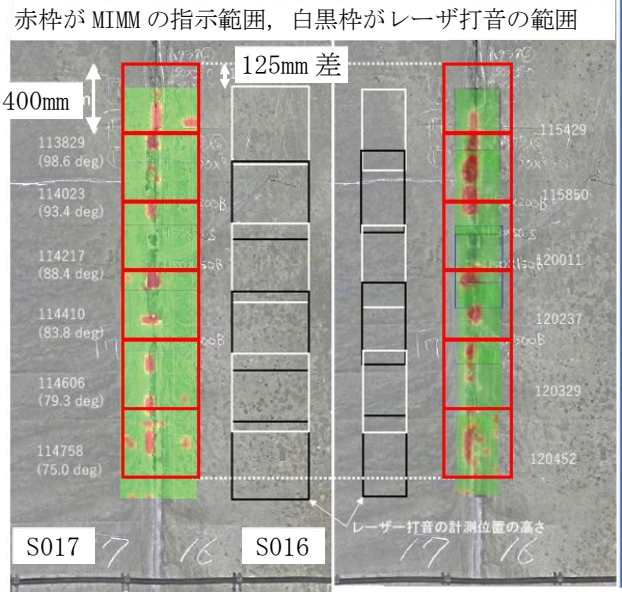


図-2.8.3 名津佐トンネルにおけるレーザー打音検査装置の計測結果 (計測範囲の計算と実測の精度)

レーザー打音箇所の絞り込みとレーザー照射時間短縮の開発は、打音箇所と打音ピッチ間隔を決定する定量的な判定フローの構築を行い、3次元視差誤差対応についても処理ロジックを追加した. レーザー打音装置に伝送する開発としては、図-2.9.1の抽出位置をメッシュ座標で出力し、MIMMとレーザー打音検査装置が独立したシステム車両としても、事前に座標ファイルを共有する事で、レーザー打音装置と座標連携が実運用可能なレベルである事が確認できた.

レーザーの照射に掛かる時間は、本研究の開始時点においてレーザー打音検査の時間の半分程度を占めており、ピッチ間隔の最適化は高速化において重要な要素であった. 実証試験時においてトンネルの横断目地周辺の幅約 50mm の欠陥を対象として、欠陥の検知に必要な打点間隔の最適化を行ない、横断目地に対してレーザー打音を実施する際には、図-2.9.2 の計測間隔の最適化試験から計測間隔を 3 ~ 5cm 以内が基準値として有効である事が確認できた.

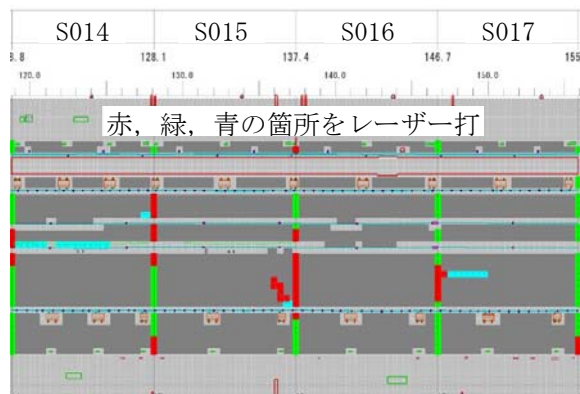


図-2.9.1 レーザー打音箇所の位置情報図



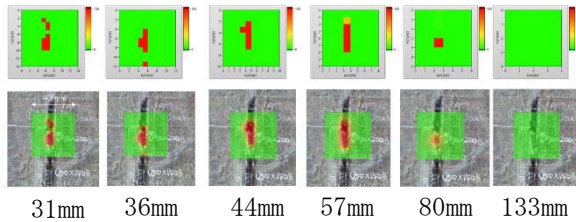


図-2.9.2 レーザー打音の検査間隔

## 2.10 申し送り事項

図-2.10.1のレーザー打音検査装置における各作業を適切に組み合わせる事により、従来検査員の4.2倍掛かっていた検査時間を2.2倍にまで高速化する事ができた。今後、レーザー打音装置の改良及びMIMMとの連携の精度向上により、最大で検査員の1.2倍までの高速化が期待できる。

計測条件	MIMM無し 正方形照射	MIMM有り 正方形照射	MIMM有り 長方形照射	MIMM有り 長方形照射	レーザーの 調整を自動化	車両位置の常時 計測を実装
ステータス	現状	目地以外の 推奨条件	目地部の 推奨条件	最速条件	改良込み 推奨条件	改良込みの 最速条件
位置確認 [秒]	50	0	0	0	0	0
附帯物確認 [秒]	10	10	10	0	10	0
背景写真取得 [秒]	16	16	16	0	16	0
スキャン時間 [秒]	90	90	53	53	53	53
レーザーの調整 [秒]	13	13	13	13	0	0
所用時間/回 [秒]	179	129	92	66	79	53
目地半周の スキャン回数 [回]	18	18	18	18	18	18
目地半周の 所要時間 [秒]	3222	2322	1656	1188	1422	954
目地半周の 所要時間 [分]	54	39	28	20	24	16

検査員による目地の検査に掛かる時間は約 13 分

レーザー打音時間は検査員の約 2.2 倍 (推奨条件) 約 1.8 倍 (改良込みの推奨条)

### 「推奨条件」のポイント

- ・ 附帯物の確認  
ケーブルなどで狭隘な箇所における誤照射を確実に回避可能。
- ・ 背景写真の取得  
MIMMの覆工展開写真へのデータの貼り付け精度が保証される。

### 「装置の改良」のポイント

- ・ レーザーの相対位置の調整 (ソフトの改良)  
プログラムの改良により、照射位置に応じて自動で補正係数を設定。
- ・ 車両位置の常時計測 (ハードの改良)  
レーザー照射時の車両の位置を毎回計測することで覆工展開写真への貼り付け精度が向上し、背景写真の取得が不要になる。

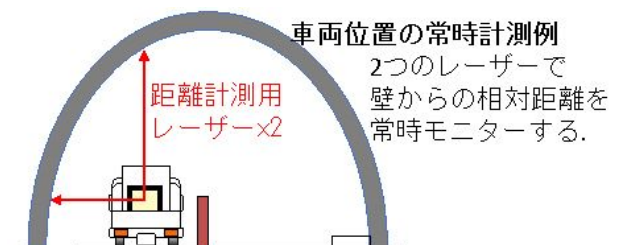


図-2.10.1 レーザー打音検査の高速化検証

# 第3章 レーザー打音検査装置の橋梁構造物点検に向けた改良

## 3.1 研究の目的

レーザー打音検査装置<sup>1-3)</sup>は、高強度レーザーを利用して打音検査を遠隔化・デジタル化する装置である。トンネルの覆工コンクリートの欠陥検知を主目的とした適用可能最大距離10m程度のレーザー打音検査装置は、国土交通省の点検支援技術性能カタログの非破壊検査技術（トンネル）に登録番号TN020003-V0323として登録され<sup>4)</sup>、運用されている<sup>5-8)</sup>が、それ以上の距離では様々な技術的な課題から実用化には到っていない。一般的な橋脚高さは30m程度以下であるが、**図-3.1.1**に示すような高橋脚（22m）では一般的な点検車では近接が困難となる。

本研究では、高所作業の負担を低減するため、レーザー打音検査の適用可能範囲を30m以上に拡大するための技術開発及び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を目的とした。

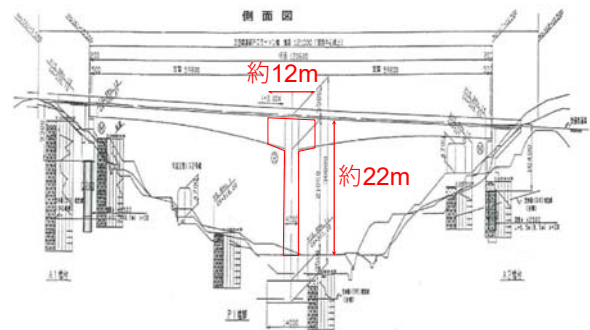


図-3.1.1 高橋脚の例

表-3.2.1 下部工高さの分類別割合  
(中部地方整備局管理橋梁)

下部工高さ(注1)	橋梁数	割合
12 m以下	3,834	69.1%
12 m～15 m	199	3.6%
15 m～20 m	115	2.1%
20 m～25 m	31	0.6%
25 m以上	28	0.5%
不明(注2)	1,338	24.1%

注1：同橋梁内の複数下部工(橋台・橋脚)の最大高さ  
注2：不明橋梁の内訳【溝橋：約75%，高架橋：約10%，  
1径間橋梁：約10%，橋側歩道橋：約5%】

## 3.2 ロングレンジ化距離の目標設定

ロングレンジ化距離の目標を設定するため、中部地方整備局が管理する橋梁を対象として、検査対象と想定する下部工高さを**表-3.2.1**に整理した。橋梁数は、約5,500橋（R2橋梁管理カルテより）であり、下部工高さ25m程度まで適用可能となれば、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（残り3%は、下部工高さ25m超えの28橋と下部工高さ不明のうち高架橋の約130橋を想定）。**図-3.2.1**にコンクリート面へのレーザー入射角（0度がコンクリートに垂直）を最大60度(a)、30度(b)とした場合のレーザー打音検査装置の適用可能な範囲を示す。現在のレーザー打音検査装置の照射可能距離は最大約15mであり、入射角を60度した場合7.5m、30度とした場合13mが適用可能な高さとなる。本研究における最大照射距離を30m、最大入射角を60度と設定することで、入射角60度の場合15m、入射角30度の場合26mの高さまでの下部工の検査が可能となる。また、大多数を占める下部工高さ15m以下の橋梁では、装置を固定した状態で水平方向26mの広範囲に渡る計測が可能となる事に加えて、検査箇所の下に装置を設置する必要がないため、跨線橋などへの適用も期待できる。

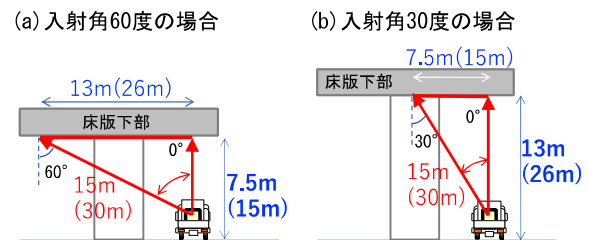


図-3.2.1 レーザー打音検査装置の適用可能範囲。  
括弧内が目標値。

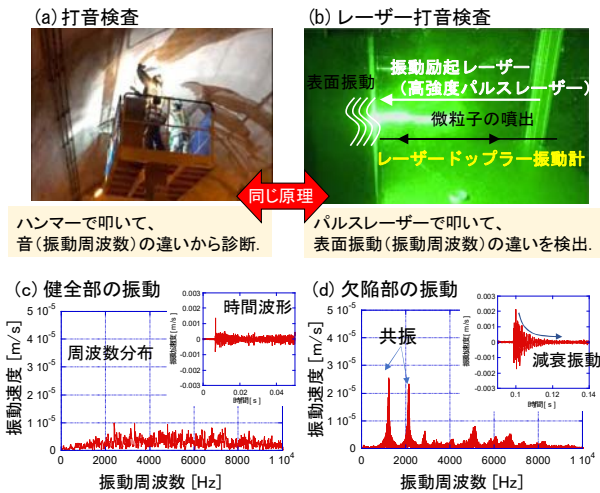


図-3.3.1 レーザー打音検査の原理

### 3.3 研究の概要

レーザー打音装置では、打音検査におけるハンマーの代わりにコンクリート表面に振動を励起するためのパルスレーザーである「振動励起レーザー」及び、生じた振動を計測するための連続発振(Continuous Wave: C.W.)レーザーである「振動計測用レーザー(レーザードップラー振動計)」の2種類のレーザー装置を使用することで、打音検査を遠隔化・デジタル化する(図-3.3.1)。

コンクリートの内部に欠陥がある場合には、振動スペクトルに欠陥の構造に起因した共振が生じることで数ms以上の時間にわたり減衰振動が観測されると共に、振動周波数にピークが生じる。欠陥がない場合には振動は速やかに収束すると共に、振動周波数に明確なピークは計測されない。これを利用し、本方式では、減衰振動と振動周波数のピークの有無から欠陥の判定を行なっている。

レーザー打音検査のロングレンジ化には、振動励起レーザーの伝搬途中でのエネルギーの散逸・集光性能の低下による加振力の低下や、レーザードップラー振動計の計測信号量の低下等の問題を解決する必要がある。本研究では、振動励起レーザー及びレーザードップラー振動計のビーム径及び出力の増大によりこれらの問題を解決し、新たに開発した「可搬型長距離レーザー打音検査装置」により、コンクリート橋梁において現役の検査員により健全度II(要経過観察)と判定された欠陥を、距離30m・入射角45度の条件下で検知することに成功した。

### 3.4 振動励起用レーザーのロングレンジ化

レーザー打音検査では、図-3.3.1(b)に示すように高強度のパルスレーザー(振動励起レーザー)をコンクリートに集光して照射する事で、コンクリートの表面の一部を蒸散(プラズマ化)させ、その反作用でコンクリートを振動させるため、加振力は集光性能に依存する。高強度のパルスレーザーを遠距離

で集光した場合、「集光強度の低下」及び「伝搬途中での空気のプラズマ化」の2つの問題が生じる。

一般に、光の集光径 $r$ は、光の波長 $\lambda$ 、集光光学系のF値を用いて、 $r \sim F\lambda$ と表される。F値は、レンズの集光距離 $f$ 、レーザーの直径 $R$ を用いて $F = f/R$ と表される。例えば波長 $1\mu\text{m}$ 、直径 $20\text{mm}$ の光を焦点距離 $10\text{m}$ のレンズで集光すると、F値は $500$ ( $F = 10\text{m}/20\text{mm} = 500$ )で集光径は $500\mu\text{m}$ となるが、これを $30\text{m}$ 先で集光すると、F値は $1500$ ( $F = 30\text{m}/20\text{mm} = 1500$ )で集光径は $1.5\text{mm}$ となるため集光強度は約 $1/10$ に低下し、表面のプラズマ化が抑制されることで加振力が低下する。

また、高強度のパルスレーザーを遠方で集光させると、図-3.4.1(a)に示すようにレーザーの伝搬途中で大気をプラズマ化する確率が增大する。大気中のプラズマの発生確率は、主に「レーザー強度」「大気中のチリの密度」等によって決まり、途中でプラズマが発生すると大気の屈折率の変動によりレーザーの伝搬が阻害され、振動励起効率が低下してしまう。これは、図-3.4.1(b)の中段に示すように、振動励起レーザーのビーム径を変えずに長距離で集光したために、集光しながら伝搬する途中のレーザー強度の高い領域(赤色で塗られた領域)が増大したためである。

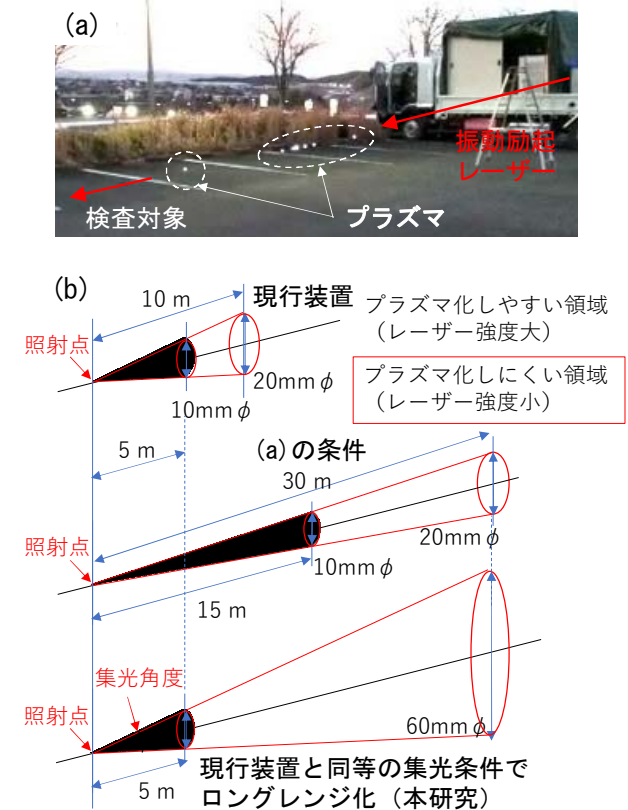


図-3.4.1 (a)振動励起レーザー伝搬中の大気のプラズマ化 (b)集光角度の調整によるプラズマ化の抑制

これを解決する方法として、10m照射時の振動励起レーザーと同程度の集光条件（集光角度）とする必要がある。「F値の大きさ」と「伝搬時の大気プラズマ化」の2つの課題を解決するために、本研究では、距離の増大率（10m→30m：3倍）に合わせて、振動励起レーザーのビーム径を増大させた。図-3.4.2に、ロングレンジ化試験用の振動励起レーザー装置及び試験配置を示す。使用したレーザーは波長1064nm、最大出力2.5J/shot、パルス幅約10nsのNd:YAGレーザーである。新たに設計した拡大・集光光学系により、集光用レンズの直前でのビーム径は、67mmまで拡大されている（10m計測用レーザー打音検査装置（20mm）の3倍以上）。装置は量子科学技術研究開発機構の駐車場の屋外試験場のテント内に設置し、電力はディーゼル発電機から供給した。使用した供試体は、縦300mm、横300mm厚さ100mmのコンクリートブロック（打設28日後の圧縮強度27N/mm<sup>2</sup>）に、縦150mm、横150mm、厚さ5mmの発泡スチロールが模擬欠陥として埋め込まれており、検査員による判定では埋設深さ10mmの供試体は健全度III、埋設深さ30mmの供試体は健全度IIと判定されている。本試験では、加振性能と振動計測器の性能を独立して評価するために、振動計測用に市販のレーザードップラー振動計（ポリテック社製RSV-150）を使用した。本レーザードップラー振動計は、波長1.55μmの水による吸収が大きい光を使用しているため濡れた面の計測は不得手であるが、条件（表面の粗さ、色、等）によっては、100m以上離れた対象の計測も可能であるため、長距離照射時の加振力の評価装置として使用した。なお、振動励起レーザーの波長（1μm）も水に対して若干の吸収があるが、これはレーザーの吸収率を高め、加振力を向上させるため、問題とはならない。

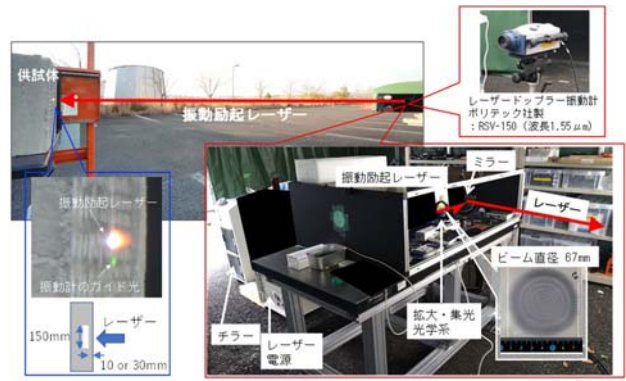


図-3.4.2 ロングレンジ振動励起レーザーの試験配置

最大40m離れた供試体を対象に照射試験を実施した結果、従来の2倍以上の2.5J/pulseの出力でも大気プラズマ化が起らず、正常にレーザーの伝搬が可能であることが確認された。

図-3.4.3に、埋設深さ10mm（健全度III）の供試体を対象とした加振試験結果を示す。試験は、30m及び40mの距離において、入射角0度、45度、60度の条件下で行い、3回の振動励起レーザーの照射により、供試体の中心付近での振動の時間波形と周波数分布（スペクトル）を得た。

実施した全ての条件下において、明確な減衰振動及び本供試体の基本振動である1.2kHzのピークが観測された。距離の増大による信号量の低下は、振動励起レーザーの集光性能の低下（距離に比例して集光径が大きくなる = 加振力が低下）を示している。また、入射角の増大による信号量の低下は、計測器に対する見かけ上の変位量の低下（入射角θの場合、観測方向に対する振幅はcosθ倍になる）に加え、斜め入射したことによる集光径の増大（1/cosθ倍になる）の影響を示している。

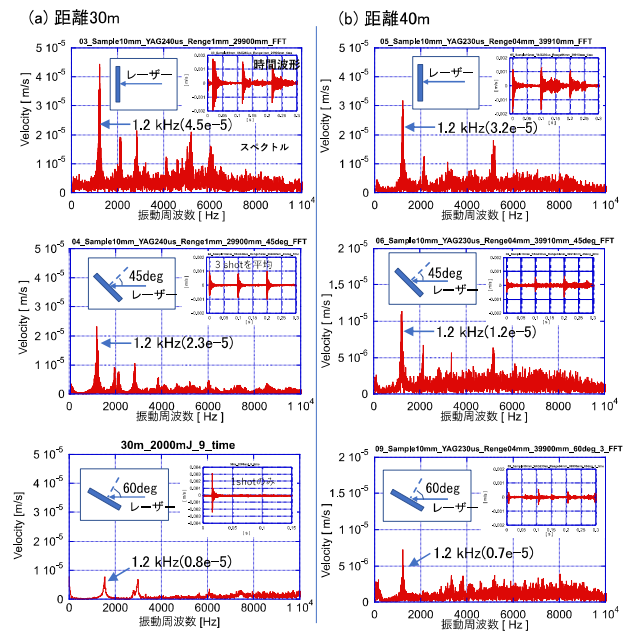


図-3.4.3 健全度III相当の供試体の長距離加振試験

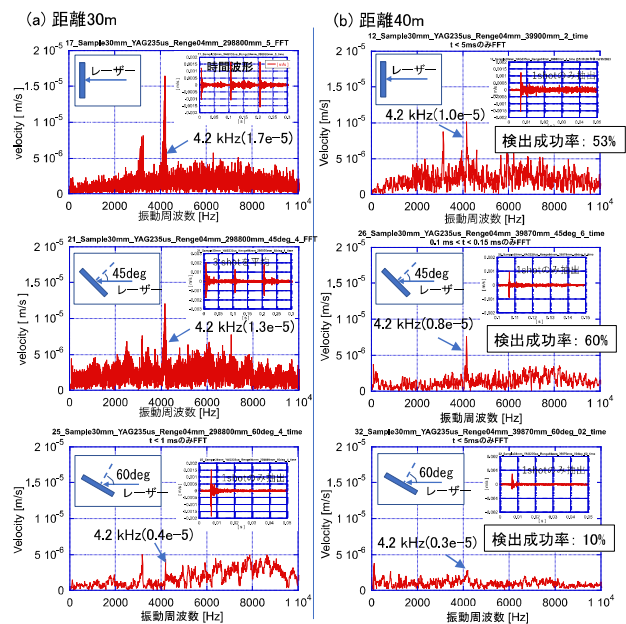


図-3.4.4 健全度II相当の供試体の長距離加振試験

しかしながら、複数回の計測に対して安定して減衰振動及び1.2kHzのピークが観測されていることから、健全度IIIの供試体に対しては40mまでの距離において十分な加振性能が得られることが示された。

図-3.4.4に、埋設深さ30mm（健全度II）の供試体を対象とした試験結果を示す。試験は、30m及び40mの距離において、入射角0度、45度、60度の条件下で行い、3回の振動励起レーザーの照射により、供試体の中心付近での振動の時間波形とスペクトルを得た。

実施した全ての条件下において、明確な減衰振動及び本供試体の基本振動である4.2kHzのピークが観測されたが、距離40mにおいてはそれらの検出の成功率（検出率）の低下が確認された。具体的には、入射角0度では19回の計測中10回（53%）、入射角45度では10回の計測中6回（60%）、入射角60度では10回の計測中1回（10%）と、検出率が入射角の増大に従い明確に低下した。距離30m入射角60度における信号量（ $4 \times 10^{-6}$  m/s）は距離40m入射角0度及び45度における信号量（ $1 \times 10^{-5}$  m/s,  $8 \times 10^{-6}$  m/s）よりも小さいにも関わらず、検出率の低下は観測されていないため、検出率の低下の原因は信号量の低下とは別にあると考えられる（検出器の限界ではない）。検出成功時の信号量は検出に十分な量であることから、距離の増大によるレーザーの集光性能の低下（不安定化）が要因であると考えられる。レーザーが通過する大気の揺らぎは屈折率分布の変化と同義であり、光が不規則に屈折することで光の直進性が損なわれ、結果として距離が増大すると集光性能は低下する。従って、健全度IIの供試体に対する本装置の加振可能な範囲は、最大で距離40m・入射角60度であるが、実用的な検出率（50%以上であれば、3回照射すれば検知可能）が得られるのは距離40m・入射角45度までとなった。

### 3.5 振動測定用レーザーのロングレンジ化

振動計測レーザーでは、連続的に発振するC.W.レーザーを検査対象に集光・照射し、照射点から発生する散乱光を用いて振動を計測する。振動する表面からの散乱光の周波数は、散乱した瞬間における表面の速度とその方向によって決まるドップラーシフトを受けるため、周波数のシフト量を計測することで表面の速度を計測することが出来る。これは、レーザードップラー振動計として知られており、非接触での振動計測装置として広く普及しているが、市販の長距離用レーザードップラー振動計は、水に対する吸収の大きい波長（ $1.55\mu\text{m}$ ）を使用しているため、本研究では、屋外でのコンクリートの振動計測用に波長 $0.53\mu\text{m}$ の水を透過する波長を使用した装置を開発した。レーザードップラー振動計をロングレンジ化する場合、対象までの距離の2乗に反比例して散乱光の強度が減少するため、レーザー出力の増大及び散乱光を効率良く収集するために出射口の光学素子の大口径化が必要となる。

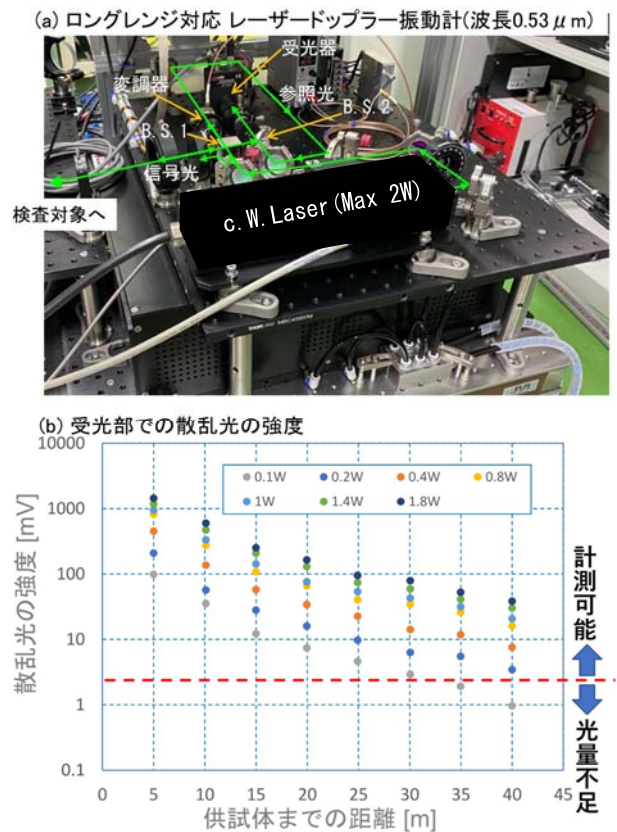


図-3.5.1 ロングレンジ対応レーザードップラー振動計

図-3.5.1に、光学素子の口径を従来の $50\text{mm}\phi$ から $100\text{mm}\phi$ の2倍に拡大し、レーザー出力を従来の $0.2\text{W}$ から最大 $1.8\text{W}$ に増大したロングレンジ化した波長 $0.53\mu\text{m}$ のレーザードップラー振動計及びその受光器が受けた散乱光の強度の計測値を示す。本装置では、周波数のシフト量を高精度で計測するため、干渉計を構成している。レーザー光をビームスプリッター（B.S.）1で計測対象へ向かう光と参照光に分離し、散乱して戻ってきた信号光と参照光をB.S.2で重ね合わせ、干渉させた光（周波数のビート信号）を検出器により計測している。なお、振動計測用レーザーは連続発振光でありピーク強度が低いため、振動励起レーザー（パルスレーザー）で問題とした大気のプラズマ化は起こらない。トンネル計測用のレーザードップラー振動計の運用実績から、安定した計測に必要な散乱光の強度は受光器の出力に換算して約 $3\text{mV}$ であることが判明しており、本機では距離40mにおいても十分な散乱光強度が得られている。

### 3.6 長距離レーザー打音検査装置の開発

レーザー打音検査では、10ナノメートル（1ミクロンの1/100）程度の小さな振動を計測するため、外部からの振動の影響を除去するために装置は専用の除振台上に設置すると共に、周囲は防音壁で囲む必要がある<sup>7,9)</sup>。

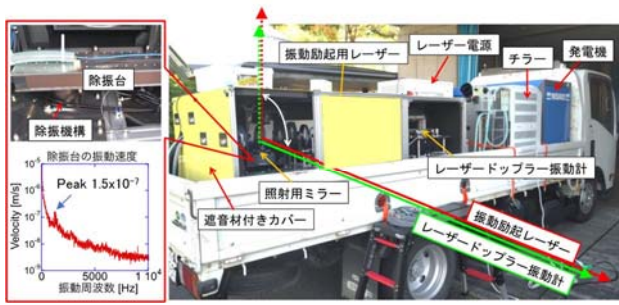


図-3.6.1 長距離レーザー打音検査装置（可搬型）

開発したロングレンジ振動励起レーザー及びレーザードップラー振動計を除振台上で再構築すると共に、2つのレーザー光を同軸で検査対象まで導くためのレーザー照射システムと合わせて一体化した可搬型の長距離レーザー打音検査装置を開発した（図-3.6.1）。本装置に加えて、レーザー打音検査装置に電力を供給するディーゼル発電機、レーザー装置を駆動するための電源及びチャラーも含めて3t積みトラック上に配置した。本装置は、現在運用中のトンネル検査用レーザー打音検査装置と同様に、長距離の自走移動が可能であり、現場に到着後速やかに検査を行なうことが可能である。レーザー打音検査を行なうには、発電機によって発生する除振台上の振動がレーザーにより検査対象上加振された振動量以下に抑制されている必要がある。接触式の加速度センサー（小野測器NP-3211）を用いて計測した除振台の振動の時間波形と周波数分布を示す。

レーザー打音計測で使用する1 kHz以上の周波数帯での振動の最大速度は $1.5 \times 10^{-7}$  m/sであり、図3.4.4で計測した共振のピーク値の最小値（ $3 \times 10^{-6}$  m/s）よりも1桁小さいため、可搬型レーザー打音検査装置でも十分なS/Nを得ることが可能である。

### 3.7 橋梁構造物での欠陥検知試験

開発した可搬型長距離レーザー打音検査装置を用いて、実構造物（コンクリート橋梁）における欠陥検知試験を行なった（図-3.7.1）。検査対象は、補修材で被覆されていない床版の底面及び隅角部・張出し床版の底面とした（図-3.7.2）。本橋梁では検査員による点検が実施されており、健全度ⅡもしくはⅢと判定した範囲にチョーキングがされている。チョーキングされた箇所を中心としてレーザー打音検査を実施することで、検査員の判定の再現を目指した試験を実施した。なお、検査員により健全度Ⅲと判定された箇所は、本試験の後に叩き落としが実施されている。本試験により、距離30m入射角45度の条件下で健全度Ⅱのコンクリート橋梁の欠陥の検知が可能であることが示された。

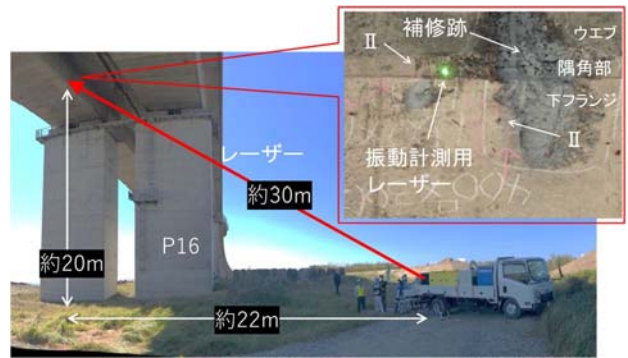


図-3.7.1 実橋梁でのレーザー打音検査の配置例

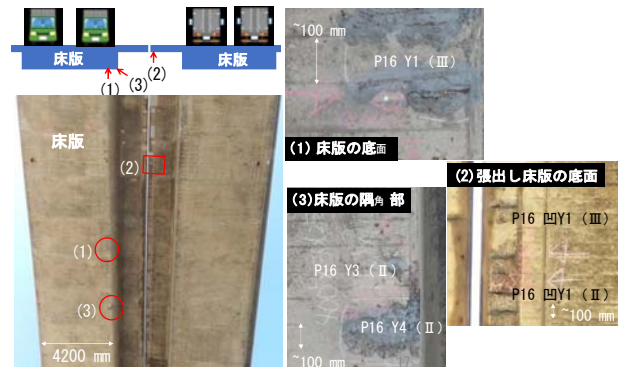


図-3.7.2 実橋梁でのレーザー打音検査の試験対象

#### (1) 床版の底面（検査員による健全度判定はⅢ）のレーザー打音検査

床版の底面のレーザー打音検査による判定結果及び代表的な振動情報を図-3.7.3に示す。検査対象のほぼ真下からレーザーを照射しており、距離は約19.5mである。赤い×印はレーザー打音により振動が検知された箇所であり打音異常と判定した。白い×印は共鳴振動が検知されなかった箇所であり健全と判定した。レーザー打音検査は、6回の計測（図-3.7.3中の1st.~6th.）を1セットとして、平均化した時間波形（図-3.7.3中のAverage）からスペクトルを求めた。時間波形の最初のピークは振動励起レーザーが入射された事を示しており、共振が発生しない場合は速やかに振動が収束し、減衰振動波形が現れない（⑤）。チョーキングの中心位置（①）では明瞭な減衰振動並びにスペクトルのピークが観測されており、レーザー打音検査でも打音異常と判定された。また、鉄筋が露出している箇所（③）においても同様に減衰振動並びにスペクトルのピークが観測されており、露出した鉄筋の付近に小さい切片状の欠陥が生じていると予想される。チョーキング範囲外（⑤）では、減衰振動が生じていないため健全と判定できたが、スペクトルにはピークが生じている。これは、振動励起レーザーで励起された振動ではなく、風や車の通過で生じた橋梁自体の振動（定常振動）により生じた周波数のピークである。

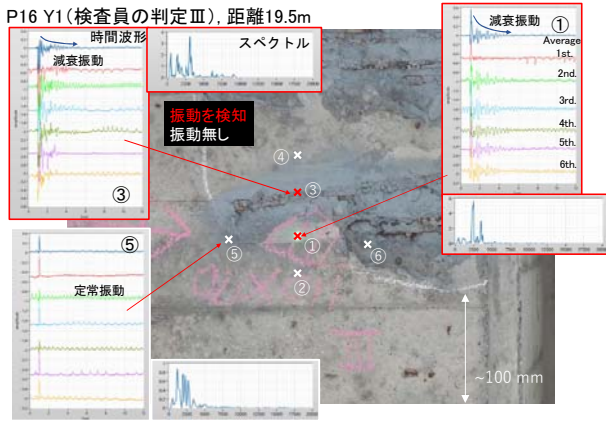


図-3.7.3 床版底面のレーザー打音検査結果

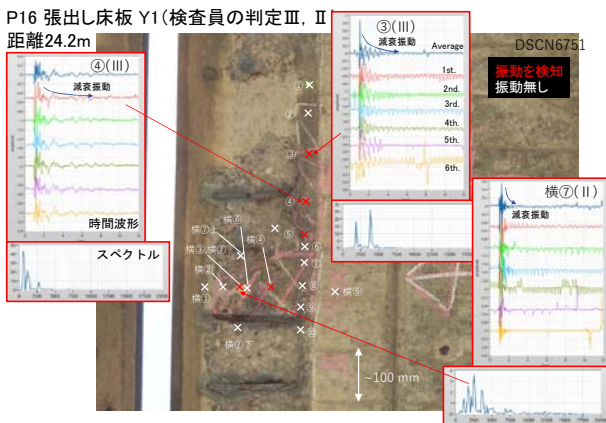


図-3.7.4 張出し床版底面のレーザー打音検査結果

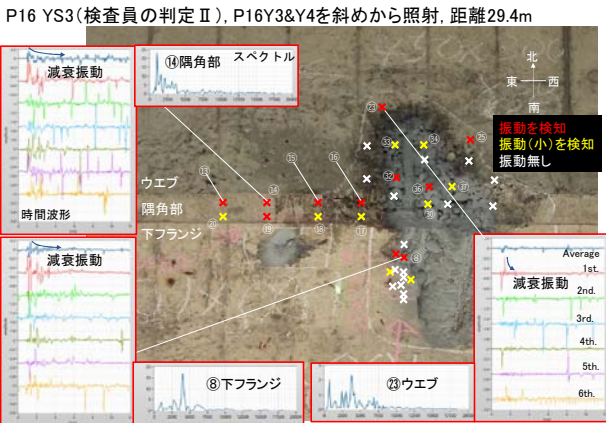


図-3.7.5 床版隅角部のレーザー打音検査結果

この定常振動は、本試験のほぼ全ての計測結果において観測されており、特にスペクトルを解析する際に注意が必要である。橋梁の定常振動については、3.8(2)項で改めて議論する。

## (2) 張り出し床版の底面（検査員による健全度判定はⅢ or Ⅱ）のレーザー打音検査

張り出し床版の底面のレーザー打音検査による判定結果及び代表的な振動情報を図-3.7.4に示す。検査対象のほぼ真下からレーザーを照射しており、距離は約24.2mである。その他の試験条件は3.7(1)項

と同様である。検査員により健全度Ⅲと判定された箇所(③, ④)では、明確な減衰振動及びスペクトルのピークが観測されており、レーザー打音検査でも打音異常と判定することができた。また、健全度Ⅱと判定された箇所(横⑦)においても減衰振動が観測されており打音異常と判定することができた。

## (3) 床版の隅角部付近（検査員による健全度判定はⅡ）のレーザー打音検査

床版の隅角部付近のレーザー打音検査による判定結果及び代表的な振動情報を図-3.7.5に示す。検査対象に対して斜め45度からレーザーを照射しており、距離は約30mである(図-3.7.1を参照)。床版の側面(ウェブ)及び底面(下フランジ)へのレーザーの入射角は約45度であり、隅角部(切り欠き部)への入射角はほぼ0度である。赤い×印はレーザー打音により振動が検知された箇所であり打音異常と判定した。黄色の×印は微小な振動が検知された箇所であり打音異常(小)と判定した。白い×印は共鳴振動が検知されなかった箇所であり健全と判定した。その他の試験条件は3.7(1)項と同様である。検査員により健全度Ⅱと判定された箇所(⑧, ⑭)では、減衰振動が観測されており打音異常と判定することができた。鉄筋が露出している箇所(⑬)においても同様に減衰振動が観測されており、露出した鉄筋の付近に小さい切片上の欠陥が生じていると予想される。

同様に検査員に健全度Ⅱと判定されている図-3.7.4の横⑦の結果と比較すると、距離・入射角が増大したため観測された振動量は小さいが、減衰振動に着目することで距離30m・入射角45度の条件下においても実構造物の健全度Ⅱの欠陥の検知が可能であることが示された。

## 3.8 研究成果

### (1) 橋梁点検用長距離レーザー打音検査装置の開発及び実証試験

橋梁点検にレーザー打音検査装置を適用するためのロングレンジ化の技術開発を行い、供試体を用いた性能評価では、深さ10mmの欠陥(検査条件:距離40m・入射角60度)、深さ30mmの欠陥(検査条件:距離40m・入射角45度)の検知に成功した。可搬型の長距離レーザー打音検査装置により、実構造物(コンクリート橋梁)の欠陥検知試験を実施し、距離30m・入射角45度の条件下で、検査員により健全度Ⅱと判定された欠陥の検知に成功した。

### (2) 本研究により明らかとなった課題

橋梁を対象としたレーザー打音検査試験において、「橋梁自体が常に振動しているため、レーザーが励起した欠陥の共鳴振動と橋梁自体の振動が混在してしまう」という新たな課題が判明した。

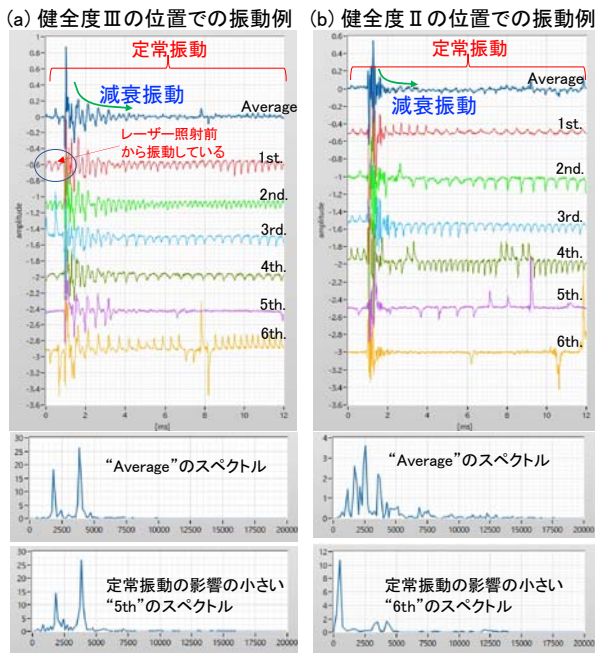


図-3.8.1 環境振動が周波数分布に与える影響

橋梁はトンネルとは異なり、風や車の通過の影響を受けて常に振動をしている。レーザー打音検査で主な対象としている振動の周波数は1kHzから20kHz程度であり、それ以下の周波数での振動であればレーザー打音検査に影響は無いが、本試験の結果、同じ帯域にも定常振動（環境振動）が発生していることが判明した。

この影響は、特にレーザー打音検査における共鳴振動の小さい健全度IIの欠陥に対する検査において顕著となる。図-3.8.1に、健全度III及びIIの欠陥に対するレーザー打音検査の結果の例を示す。1st.～6th.の時間波形の平均から求めた通常のスเปクトルと、定常振動の影響の小さい時間波形のみを選択し、かつ減衰振動の明瞭な時間帯のみを対象としてフーリエ変換を行なうことで環境振動の影響を可能な限り排除したスเปクトルの比較を行なった。

健全度IIIの場合、スเปクトルの分布に大きな変化は無く、環境振動による影響が小さいことが分かる。健全度IIの場合、スเปクトルの分布は大きく異なっており、減衰振動の振幅が環境振動と同程度もしくは持続時間が短い場合にはスเปクトルを用いた診断には十分な注意が必要であることが分かる。

環境振動に対する対策を以下に挙げる。

対策1. 検査員の判定がIIの箇所の検査では、環境振動を差し引く。

対策2. 検査員の判定がIIの箇所の検査では、環境振動の影響の小さい波形のみを選択し、減衰振動の明確な時間帯のみを選択してフーリエ変換をする（図

-3.8.1で採用した方法）。

対策3. 減衰振動の有無で評価する。

本研究における欠陥検知試験（3.7節）では、異常・健全の判定が最も容易な対策3.を用いて判定を行なったが、トンネルのレーザー打音検査と同等の「スเปクトル分布からの健全度の判断（共鳴周波数が低いほど剥落の危険性が増す）」は困難である。本プロジェクトのテーマ3、テーマ4を通じて、「減衰振動の持続時間と健全度の関連性」が明らかとなってきており、対策3.の発展系として、橋梁のレーザー打音判定にも適用可能であると期待される。

### 3.9 申し送り事項

3.8 (2) 項で議論した様に、橋梁のレーザー打音検査に関しては、車の通行や風などの外力による橋梁自体の振動がレーザー打音で励起された振動と同程度の場合、振動スเปクトルに大きな影響を与えることが明らかとなった。橋梁自体の振動と区別可能な減衰振動波形の持続時間による欠陥判定等の新しい判定など、橋梁等を対象とした欠陥判定手法の開発が重要である。

### 参考文献

- 1) 島田義則, 検査技術, Vol.11, No.9 (2006) pp.8-14.
- 2) 御崎哲一:「レーザーを用いたトンネル覆工コンクリートの欠陥検出方法に関する研究」, 京都大学社会基盤工学博士論文, 2015.
- 3) Noboru Hasegawa, Masaharu Nishikino, Hajime Okada, Shuji Kondo, Toshiyuki Kitamura, Masamichi Abe, Kazuhisa Masuzoe, Shigeru Kogure, ITA-AITES World Tunnel Congress, WTC2020 and 46th General Assembly Kuala Lumpur, Malaysia 11-17 September, pp.653-656, 2020.
- 4) 国土交通省, 点検支援技術性能カタログ, 非破壊検査技術 (トンネル), pp.2-4-17, 2020.
- 5) 坂本勝哉, 木暮繁, 錦野将大, 岡田大, 近藤修司, 北村俊幸, 長谷川登, 光アライアンス, Vol.32, No.12, pp.38-43, 2021.
- 6) 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, 計測と制御, Vol.60, No.11, pp.765-769, 2021.
- 7) 長谷川登, 錦野将元, 岡田大, 近藤修司, 北村俊幸, 木暮繁, フォトニクスニュース, Vol.7, No.1, pp.20-24, 2021.
- 8) 戸本悟史, 長谷川登, 岡田大, 近藤修司, 北村俊幸, 三上勝大, 錦野将元, 中村光, 構造工学論文集 Vol.68A, No.3, pp.671-684, 2022.
- 9) 岡田大, 長谷川登, 三上勝大, 近藤修司, 錦野将元, 河内哲哉, レーザー研究, Vol.45, No.7, pp.427, 2017.



# 第4章 レーザー打音検査装置への複数の状態の異なるうき・剥離の検出能力追加検討

## 4.1 研究の目的

複数の状態の異なるコンクリートのうき・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、様々な状態のうき・剥離を検出できるようにする。そのため、状態の異なる供試体を複数製作し、室内実験によりその判別について検討する。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を行い、状態の異なるうき・剥離を区別して検出できるようにする。

## 4.2 研究の概要

本研究では、①状態の異なるうき・剥離を模した供試体を製作し、②室内実験に基づく状態の異なるうき・剥離の波形異常の分析と評価検証を行うとともに、③実構造物におけるレーザー打音と点検技術者による打音検査との比較検証を行い、第5章の診断支援となる閾値や評価方法を構築するための基礎データを取得した。

## 4.3 状態の異なるうき・剥離を模した供試体の製作

### (1) 供試体製作の方針

状態の異なるうき・剥離を模した供試体を製作するにあたり、橋梁及びトンネル点検で適用される各種要領（「橋梁における第三者被害予防措置要領（案）（平成28年12月 国土交通省 道路局 国道・防災課）」、「道路トンネル定期点検要領（平成31年3月 国土交通省 道路局 国道・技術課）」）を参考に、損傷レベルを表-4.3.1に示す3段階に分類することとした。この中で、レベルIIとレベルIIIを適切に評価するには、実際に石刃ハンマー（約910g）で叩き落としを行い、最終決定する必要があるため、同条件の供試体を複数製作することとした。

### (2) 橋梁点検用の供試体

橋梁で多く見られるうき・剥離として、地覆や桁などの隅角部で発生するものや、床版など面的に発生するものが考えられる。

表-4.3.1 損傷検知レベルの細分化

損傷レベル	評価	評価内容
レベルI	健全	明確なうき・剥離がない健全な状態
レベルII	要注意	早期にはく落する可能性は低いですが、将来問題となる可能性があるうき・剥離
レベルIII	措置	直ちに措置すべきうき・剥離

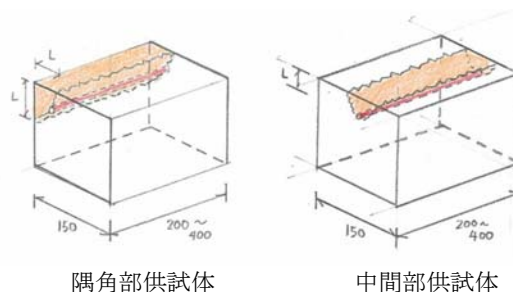


図-4.3.1 製作する供試体の概要

その発生原因は様々であるが、主に中性化や塩害等の劣化因子により内部鉄筋が腐食し、不働態被膜が破壊され、コンクリートとの付着力が低下してかぶり面が剥離するケースや、そもそもかぶりが不足し、劣化因子が容易に内部鉄筋に進入し、結果としてかぶり面が剥離するケースが考えられる。それらを踏まえ、図-4.3.1に示す、地覆や桁をイメージしたコンクリート隅角部にうきが発生する供試体（隅角部供試体）、床版をイメージしたコンクリート中間部にうきが発生する供試体（中間部供試体）を製作し、かぶりを10mm～30mmと設定を変えながら、供試体の再現を図った。

### (3) トンネル点検用の供試体

トンネル変状の大半は覆工目地部のうき・剥離が、全体の50%～90%を占めており、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費やしている。覆工目地部のうき・剥離は、覆工打設時のセントルの押し付け圧などにより生じる打ち継ぎ目隅角部に発生する比較的浅い深度での半円状の貫通ひび割れ、コンクリート打設時の充填不足等による骨材分離、また型枠下端からのコンクリートペーストの漏れにより空隙が生じ脆くなっている状態などが要因と考えられている。このため、本研究では、深さ

30mm程度の内部欠陥によるうき・剥離を想定し、供試体の再現を図った。なお、トンネル点検用の供試体は先に示した橋梁点検用の供試体のうち、隅角部供試体と読み替えて、同じ供試体を用いて実験を行うこととした。

#### (4) 供試体の製作方法

R3年度では、供試体製作方法として、①内部鉄筋を電氣的に腐食させ、うき・剥離を発現させる方法<sup>1),2)</sup>、②鉄筋の代わりに静的破砕剤を用い、内部からの膨張力により、うき・剥離を発現させる方法<sup>3),4)</sup>の2通りで実施した。①は現実的な劣化機構に伴う供試体であるものの、うき・剥離を発現させるには時間がかかるため、①による供試体製作と並行して、②による供試体製作を行い、供試体の数量を増やし、R4年度を見据え、データの蓄積を行った。

ここで②の静的破砕剤について補足する。静的破砕剤とは主成分が酸化カルシウムであり、水と水和反応されることにより緻密なコロイド状の水酸化カルシウムを生成するものであり、この生成した水酸化カルシウムは時間経過とともに長大な異方性の六角板状の結晶へ成長し、孔内では相互に押し合う結晶体となり、その結晶圧を拘束壁の膨張圧として生成させるものである。本研究では、それら特性を生かし、一般にコンクリートや岩盤を静かに破砕するために用いられる、太平洋マテリアル(株)の太平洋ブライスター100®を静的破砕剤として使用した。これら材料をコンクリートに埋設した金属パイプ内に充填させ、水破砕剤比で膨張量をコントロールしながら、理想のうき・剥離の発現を目指した。

R3年度は、水破砕剤比(W/E=30%~42%)、金属パイプの材質(アルミニウムorステンレス)や径(9.5mm~32mm)等を変えながら供試体製作を行い、結果として、200体近くの供試体を製作し、理想のうき・剥離が発現する方法を検討した。

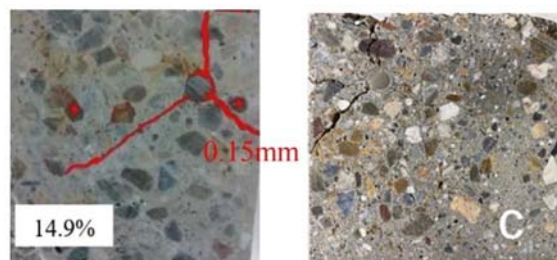
R4年度は、R3年度で得られた知見を踏まえ、新たに供試体製作の方針を定めることにした。R3年度で得られた知見を以下に示す。

- ・①で発現したひび割れと②で発現したひび割れの形状は概ね一致している。(図-4.3.2)
- ・①で発現したひび割れ幅は小さいとともに、ひび割れをコントロールすることが難しい。
- ・②は、水破砕剤比や金属パイプの径を変えることで、様々なひび割れを発現させることが出来るなど、コントロールがしやすい。
- ・①は長期間に渡り電気を流し製作するのに対し、②は静的破砕剤を充填後、約10時間前後から膨張を開始し、約48時間後には膨張量が急増し、その後停滞する特性を持っており、短時間で製作することが出来る。(この特性は条件が異なっても同じ)
- ・レベルIIとレベルIIIの損傷が隣接している場合、叩き落としによる打撃力の影響により、レベルIIIの損傷へと進行する。

- ・静的破砕剤入り金属パイプと供試体側面(かぶり面以外)までの距離が短いため、コンクリート自体の拘束力が弱まり、パイプを中心に人型(120度間隔)のひび割れが発生し、叩き落としによりひび割れが進展し割裂する。(図-4.3.3)

結果として、R3年度に製作した供試体のほとんどがレベルIIIの供試体となり、レベルIIのデータ取得が進まなかった。R4年度ではR3年度で得られた知見を踏まえ、以下を重要なポイントと捉え、レベルIIの供試体の製作に注力した。

- ・①と②において、ひび割れの形状は概ね一致しているため、短時間で製作できる②の方法を基本とし、R3年度で得られた情報から水破砕剤比や金属パイプ径を選定する。
- ・かぶり面とは異なる方向へひび割れが進展することが確認されたため、かぶり面へひび割れが進行するよう、供試体自体の寸法を大きくする。
- ・中間部供試体においては、より実構造物に近づけるため、静的破砕剤入り金属パイプを2本並列に配置し、金属パイプ同士でひび割れを抑制(お椀型のひび割れを発生)させる。



鉄筋腐食させた供試体 静的破砕剤を使用した供試体

図-4.3.2 内部ひび割れ形状の比較



図-4.3.3 R3年度に製作した供試体

- ・叩き落とし後の打撃力によるひび割れの進行を

抑制させるため、拘束鉄筋を配置し、かぶり面とは反対方向へのひび割れを抑制する。

- ・その他に比較対象として、実際の現場でもよく見られる空洞、ジャンカ、木片等の異物混入を模した供試体を製作する。

図-4.3.4にR4年度に製作した供試体模式図を示す。結果として、表-4.3.2に示す28体の供試体(図-4.3.5)を製作するに至り、次節に述べるが、レベルI~IIIを発現した状態の異なる供試体を製作することが出来た。

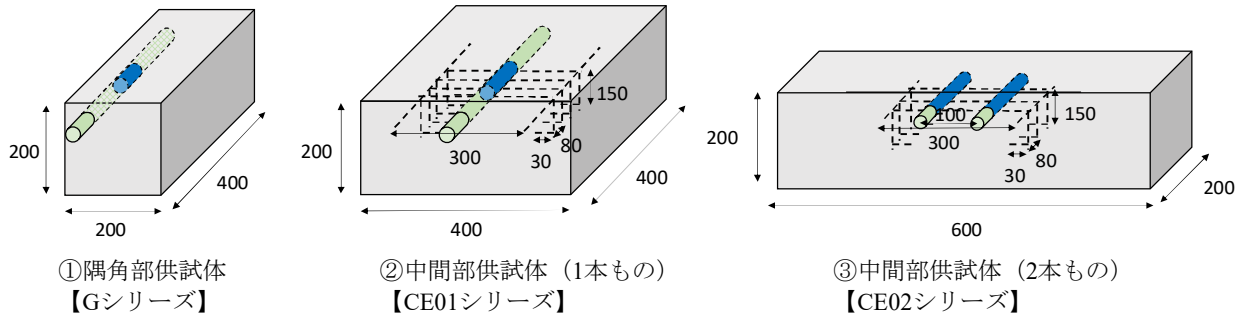


図-4.3.4 R4年度供試体模式図

表-4.3.2 R4年度製作供試体一覧

供試体種別	No	供試体名称	幅 (mm)	高さ (mm)	長さ (mm)	かぶり (mm)	パイプ材質	パイプ径 (mm)	パイプ間距離 (mm)	膨張領域 (mm)	切り込み角度	拘束鉄筋間隔 (mm)	水破砕率比 (%)
①隅角部供試体	1	GU1051/GS1051	200	200	400	10	St	9.5	-	50	90°	-	30
	2	GU1052/GS1052	200	200	400	10	St	9.5	-	50	90°	-	30
	3	GU1053/GS1053	200	200	400	10	St	9.5	-	50	90°	-	30
	4	GU1101/GS1101	200	200	400	10	St	9.5	-	100	90°	-	30
	5	GU1102/GS1102	200	200	400	10	St	9.5	-	100	90°	-	30
	6	GU1103/GS1103	200	200	400	10	St	9.5	-	100	90°	-	30
	7	GU3101/GS3101	200	200	400	30	St	13	-	100	90°	-	30
	8	GU3102/GS3102	200	200	400	30	St	13	-	100	90°	-	30
	9	GU3103/GS3103	200	200	400	30	St	13	-	100	90°	-	30
	10	GU3201/GS3201	200	200	400	30	St	13	-	200	90°	-	30
	11	GU3202/GS3202	200	200	400	30	St	13	-	200	90°	-	30
12	GU3203/GS3203	200	200	400	30	St	13	-	200	90°	-	30	
②中間部供試体 (1本もの)	13	CE0101	400	200	400	30	St	25	-	150	90°	80	30
	14	CE0102	400	200	400	30	St	25	-	150	90°	80	39
	15	CE0103	400	200	400	30	St	25	-	150	90°	80	39
③中間部供試体 (2本もの)	16	CE0201	600	200	200	30	St	13	100	200	90°	50	30
	17	CE0202	600	200	200	30	St	13	100	200	90°	50	30
	18	CE0203	600	200	200	30	St	13	100	200	90°	50	30
	19	CE0204	600	200	200	30	St	13	100	200	90°	50	30
	20	CE0205	600	200	200	30	St	13	100	200	90°	50	30
	21	CE0206	600	200	200	30	St	13	100	200	90°	50	30
	22	CE0207	600	200	200	30	St	13	100	200	90°	50	30
	23	CE0208	600	200	200	30	St	13	100	200	90°	50	30
木片1	24	WO0101	400	200	400	0→50	-	-	-	-	-	-	-
木片2	25	WO0102	400	200	400	10→50	-	-	-	-	-	-	-
発泡スチロール	26	ST0101	400	200	400	30	-	-	-	-	-	-	-
ジャンカ詰め	27	JA0101	400	200	400	30	-	-	-	-	-	-	-
コンクリート詰め	28	CJ0101	400	200	400	30	-	-	-	-	-	-	-

※①隅角部供試体内、GUは供試体の上面、GSは供試体の側面を示す。

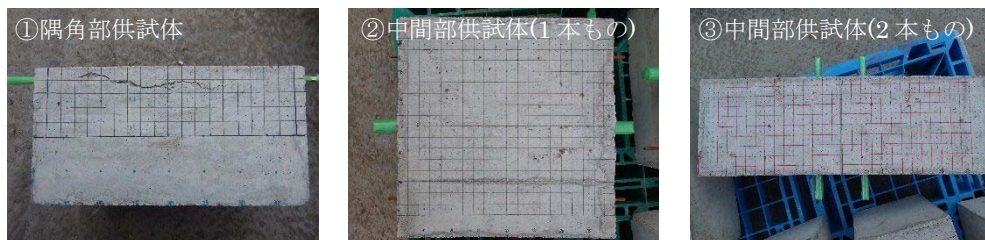


図-4.3.5 R4年度に製作した供試体

そのため、それら実験に加え、AI打音チェッカー(株)ポート電子) 鋼球落下試験を追加するとともに、叩き落とし後に供試体を切断し、内部ひび割れの確認(レベルIとIIの境界確認)を行うこととした。

結果として、28供試体に対し、①レーザー打音、②点検技術者による打音検査、③AI打音チェッカー、④鋼球落下試験、⑤叩き落とし、⑥切断を行い、損傷レベルI~IIIのうきを判定した。それぞれの実験概要を以下に示す。

①レーザー打音

- ・2.5cmピッチで実施。
- ・1点当たり3回計測し、相関性のあるデータにて平均値を採用。(ノイズデータは除外)

②点検技術者による打音検査(人力打音)

- ・2cmピッチで実施。
- ・1点当たり3名の点検技術者(トンネル点検技術者、橋梁点検技術者、若手技術者)で実施。
- ・最終的な判定結果は技術者2名以上が同判定した結果を採用。
- ・3名の結果がバラついた場合は、隅角部供試体の場合はトンネル技術者の判定を採用、中間部供試体の場合は橋梁点検技術者の判定を採用。

③AI打音チェッカー

- ・1cmピッチで実施。
- ・1点当たり1回計測。
- ・(株)ポート電子が開発したAI打音チェッカーを用い、専用ハンマーの打撃音をマイクロフォンにて収録。
- ・健全部の音を教師データとして、機械学習(AI)にてうきの有無を判定。

④鋼球落下試験

- ・1cmピッチで実施。
- ・1点当たり1回計測。
- ・直径2cmの鋼球を10cmの高さから自由落下させた際の打撃音をマイクロフォンで収録。
- ・マイクロフォンは打点位置から水平方向に2.5cm離れた、高さ3cmの位置に設置。
- ・打撃音で得られたスペクトル分布をスペクトルピークの最大値が1となるように正規化し、その時の面積の値から健全度を判断。

⑤叩き落とし

- ・「橋梁における第三者被害予防措置要領(案)(平成28年12月 国土交通省 道路局 国道・防災課)」に準拠し、石刃ハンマー(約910g)にて叩き落としを実施。
- ・実作業に近い方法となるよう、叩き落とし時は供試体を縦にし、側方から石刃ハンマーにて叩き落としを実施。

⑥切断

- ・打音検査等でうきと確認された範囲において、叩き落とし後、叩き落とせなかった範囲が存在する供試体を対象に切断を実施。
- ・内部の静的破砕剤入り金属パイプに対し、横断方向に3断面切断。

- ・切断した断面を観察し、内部ひび割れが存在する場合は、その範囲をレベルIIのうきと判断。

図-4.4.1に各実験の状況写真を示す。

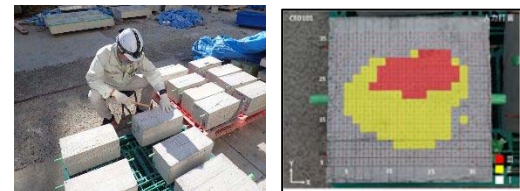
(2) 各種試験結果を踏まえた分析と評価検証

各種実験結果を整理した一例を図-4.4.2に示す。

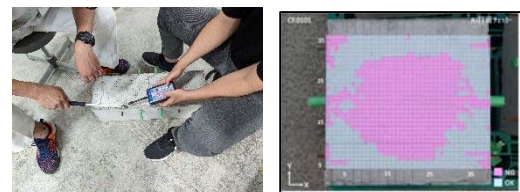
実際に叩き落としを行った結果、打音検査でレベルIIと判定した箇所の一部は叩き落とされることなく、また切断により内部ひび割れが確認されたことから、レベルIIのうきを製作することが出来た。



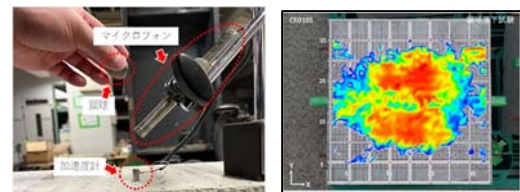
①レーザー打音



②点検技術者による打音検査(人力打音)



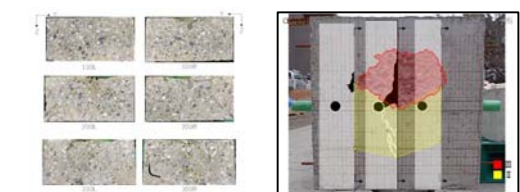
③AI打音チェッカー



④鋼球落下試験



⑤叩き落とし



⑥切断

図-4.4.1 各実験の状況

叩き落とし後（切断後）の結果を正とし、各試験結果を比較してみると、レベルIIIのうきは概ねどの試験でも検出出来ていたが、レベルIIのうきの検出にはバラつきが見られた。これは、うき深さやひび割れ幅、形状等様々な要因が考えられるため、次章では、本実験で得られた周波数特性を基に、閾値や評価方法を検討した。

#### 4.5 実構造物におけるレーザー打音と点検技術者による打音検査との比較検証

##### (1) 実構造物での実証実験

実構造物での実証実験を行うにあたり、国土交通省中部地方整備局及び管轄する国道事務所と協議を行った。

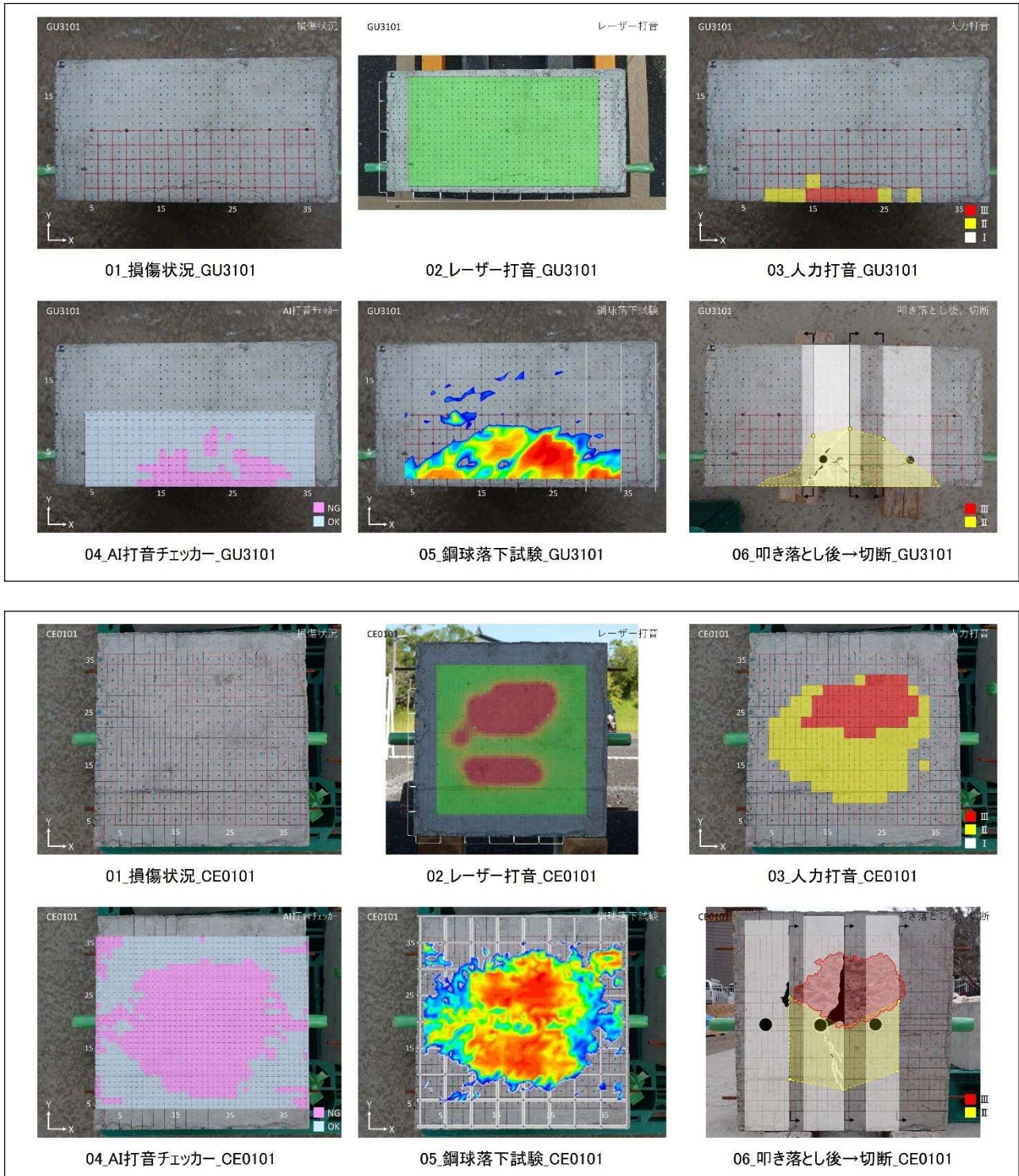


図-4.4.2 各実験結果例（上段：隅角部供試体，下段：中間部供試体）

その結果、トンネルでは「一般国道156号 名津佐トンネル」、橋梁では「一般国道1号 浜名大橋」を選定し、レーザー打音検査装置による実証実験を行った。実証実験では、供用中の実構造物への適用を検証するとともに、トンネルでは主にレーザー打音検査装置による計測の高速化を目的に、橋梁では主にレーザー打音検査装置のロングレンジ化による検出精度の検証を目的に行った。

トンネルでの実証実験の結果については第2章にて、橋梁での実証実験の結果については第3章にてそれぞれ詳述しているが、ここでは、レーザー打音検査装置で取得したデータと、実際に点検技術者が打音検査及び叩き落とした結果を比較検証した結果について述べる。

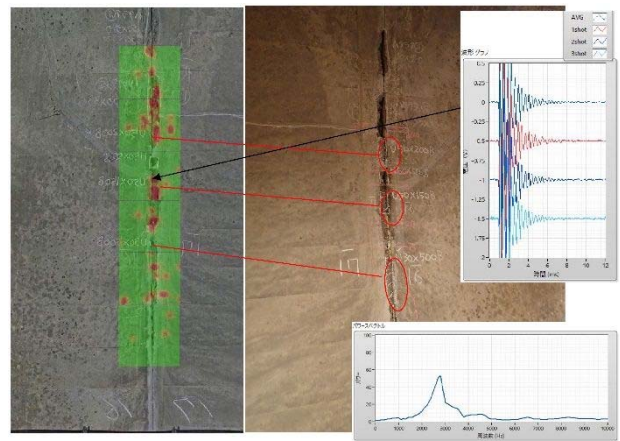


図-4.5.1 トンネル目地部での比較検証結果

### (2) 点検技術者との比較検証結果（トンネル）

点検技術者による打音検査結果と比較検証を行った結果、図-4.5.1に示すとおり、レーザー打音検査装置による計測の高速化を行った状態においても、点検技術者が叩き落とせないうき（レベルIIのうき）と判定した箇所を的確に検出出来ている。また、ラスタースキャンにおける打音ピッチは、点検技術者の打音ピッチよりも細かいため、はく落周辺の微細なうきまでも検出出来ている。



図-4.5.2 真下から照射した場合の比較検証結果

### (3) 点検技術者との比較検証結果（橋梁）

浜名大橋で使用したレーザー打音検査装置は名津佐トンネルで使用した装置とは異なり、レーザー照射距離30mの長距離化試験用装置であり、ラスタースキャンは搭載されていない。そのため、レーザー打音1点1点に対し、点検技術者による打音検査結果と比較検証を行った。

なお、比較検証を行うにあたり、まずは点検技術者による打音検査を実施し、レベルIIのうき及びレベルIIIのうきを検出した後、その範囲に対しレーザー打音を行った。また、隅角部に発生しているうきに対しては、真下からの照射に加え、斜め方向からも照射を行い、照射距離や照射角度による検出精度への影響についても検証した。

点検技術者による打音検査結果と比較検証を行った結果、図-4.5.2、図-4.5.3に示すとおり、照射距離や照射角度に関わらず、点検技術者がうきと判定した箇所について、最低1点以上で検出出来ている。しかし、検出出来ていない点も存在している。これは、図-4.5.4に示すように、照射角度によりうき深さが異なり、検出精度に誤差が生じたものと推定されるため、実用化に向けて、あらゆる角度からの照射を念頭に点検計画を検討していく必要がある。



図-4.5.3 斜めから照射した場合の比較検証結果

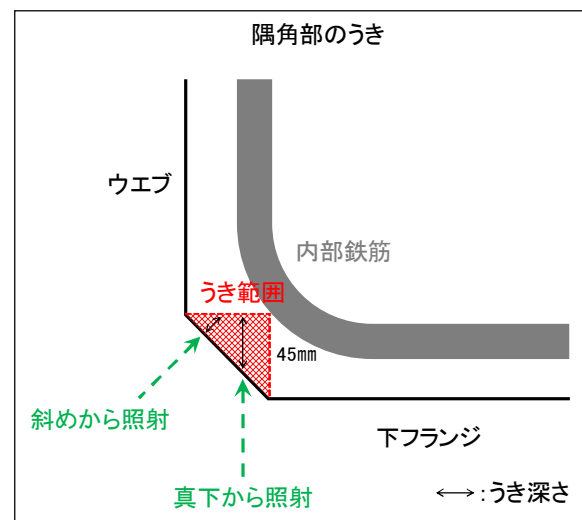


図-4.5.4 照射角度によるうき深さ

## 4.6 申し送り事項

### (1) 様々な状態のうき・剥離を模した供試体製作における申し送り事項

R3年度から取り組んできた供試体製作だが、R3年度で得られた知見を踏まえ、R4年度では様々なうき・剥離を再現する供試体を製作することが出来た。特に中間部供試体においては、一つの供試体でレベルⅢとレベルⅡのうきが発現するなど、より実構造物に近い破壊形態を再現することが出来た。しかし、その一方で隅角部供試体は、12供試体中1供試体のみレベルⅡのうきを再現するに留まり、隅角部におけるレベルⅡのうきに関する情報が少ないため、今回の知見を活かし、金属パイプ径や静的破砕剤の水破砕剤比などを調整しながら、新たな供試体製作に取り組んでいく必要がある。

また、今回、供試体に対し正面からレーザーを照射しデータを取得している。そのため、特に隅角部供試体において、奥行きのあるうきを検出出来ないケースが確認された。少し角度を変えることで検出出来る可能性もあるため、実際の現場での適用条件を整理する上でも、様々な角度からレーザーを照射し、より多くのデータを取得しておく必要がある。

### (2) 実構造物での実証実験（トンネル）

現場作業の高速化を目指し、今回、画像計測システム「トンネル点検専用車両MIMM」との併用を試み、事前に障害物の位置情報等をレーザー打音検査装置に取り込むことで、従来よりも高速化を図ることが出来た。しかし、今回の実証実験では、あくまで2スパンの目地部での検証であるため、今後はトンネル一体を対象に、車両の移動や設置時間等を加味したより現場の実情に合わせた検証が必要である。

### (3) 実構造物での実証実験（橋梁）

今回、ロングレンジ化による検出精度の検証が目的であったため、桁下高さが高く、桁下空間での作業が比較的容易な橋梁を選定した。結果として、一般国道1号の浜名大橋での実証実験を行うこととな

り、活荷重による常時振動や照射角度には多少留意が必要なものの、ロングレンジ化による検出精度についてはある一定の成果を得ることが出来た。しかし、浜名大橋のような断面の大きなPC箱桁橋は稀なケースであるため、今後はより一般的な橋（RC床版橋や鈹桁橋等）で、より活荷重による常時振動の影響を受けやすいRC床版を対象に、実証実験を行うことが必要である。

また、ロングレンジ化したレーザー打音検査装置は1点1点の照射であるため、効率が悪い。よって、面的に照射できるラスタースキャン機能への改良が必要である。また、トンネルと異なり、橋梁の桁下では自由に車両を動かすことができないケースが多いため、なるべく同じ位置でより広範囲の照射が可能となる仕様（小型化等）を検討していく必要がある。

## 参考文献

- 1) K. K. Tran, H. Nakamura, M. Kunieda and N. Ueda : Analysis of crack propagation behavior in concrete due to multi-rebar corrosion, *Journal of Structural Engineering*, Vol.58A, pp.844-853, 2012.
- 2) Di Qiao, Hikaru Nakamura, Yoshihito Yamamoto, Taito Miura : Crack patterns of concrete with a single rebar subjected to non-uniform and localized corrosion, *Construction and Building Materials*, Vol. 116, 30, pp.366-377, 2016.
- 3) 堤知明, 松島学, 村上祐治, 関博 : 腐食ひび割れの発生機構に関する研究, *土木学会論文集*, No.532/V-30, pp.159-166, 1996.
- 4) 川村佳弘, 金久保利之 : 破砕剤充填パイプにより鉄筋腐食時ひび割れを模擬した RC 梁部材の曲げ性状, 第 45 回土木学会関東支部技術研究発表会, V-22, 2018.
- 5) 油野登梧, 金久保利之, Syll, Amadou. Sakhir : 破砕剤充填パイプによる腐食ひび割れを模擬した RC 柱の中心圧縮性状, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.41, No.2, pp.109-114, 2019.
- 6) 油野登梧, 金久保利之, Syll, Amadou. Sakhir : 破砕剤充填パイプにより鉄筋腐食ひび割れを模擬した RC 部材の構造性能, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.42, No.2, pp.181-186, 2020.

# 第5章 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

## 5.1 研究の目的

第4章で実施した供試体実験結果を基に、うき・剥離範囲の検出に加え、レベルⅠ～Ⅲの各状態を分類する閾値や評価基準の構築を行う。また、そのデータは、構造物の形状寸法に沿った位置情報をもったデータとして整理、記録し出力できるようにすることで、点検後の措置や継続的な監視を可能とする。本研究では、そのために必要な記録様式や診断に必要な閾値、計測データの評価方法の構築を行う。

## 5.2 研究の概要

本章は、はじめにレベルⅠ～Ⅲの各状態を分類する閾値の検討や評価基準構築の参考とするため、国内で公表されている論文を中心に文献調査を実施し、関連する技術の概要と基本原理、試験方法等について基礎的な整理を実施した。次に、その文献調査を踏まえ、研究が進められているFFT解析を用いた欠陥判定手法（以下、従来手法）を用いて第4章で製作した供試体を用いた欠陥評価を行った。その結果、従来手法ではレベルⅡとレベルⅢの区分について精度向上が必要となったことから、減衰波形を用いた新しい評価手法を立案した。また、これらの評価手法の検討結果、及び、前章までに実施した実構造物の実証実験の結果を踏まえ、継続的な観察や措置に役立つ記録様式に関する検討、点検業務への導入に向けた手順・指針を作成するための基礎資料とりまとめを行った。

## 5.3 文献調査

文献調査は、本技術に関連する文献を集め、計測原理や概要を整理した。以下に主な調査結果を示す。

・うき・剥離を検査する従来の非破壊検査手法としては、遠隔打音法<sup>1)2)</sup>、赤外線探知法<sup>3)</sup>、ドローン法<sup>4)5)</sup>、電磁波レーダー法<sup>6)</sup>等が挙げられる。上記のいずれの手法も適用条件が厳しく、結果として簡便な打音法が主として用いられるが、打音法は可聴域と呼ばれる20Hzから20kHzの周波数域の音に限定されるとともに、周囲の騒音等に影響を受けやすく、結果として健全度評価のバラつきや見落と

し等の課題が存在する。

- ・従来の非破壊検査手法の課題を改善するため注目されたのが、技術者の技量に寄らず定量的な評価が可能である「レーザー法」である。この「レーザー法」は、健全部（うきなし）および劣化部（うきあり）において、打音法による加速度（振動）と同じような周波数ピーク、振幅スペクトル帯域を示すことが判っている<sup>7)</sup>。
- ・検証実験は、実構造物（主にボックスカルバート）や供試体で行われているが、試験数が少なく、確率的な健全度評価までには至っていない。劣化供試体も発砲スチロールの混入や、のこぎりを使つての意図的な製作等であり、現実の劣化（内部鉄筋の腐食膨張によるうき）での検証実験は行われていない。凹凸を考慮したクラック界面が再現できる供試体を製作し、適切な健全度評価（閾値）を検証していく必要がある<sup>8)</sup>。
- ・実際のコンクリート構造物の劣化状況（ひび割れ、剥離、うき等）を適切に再現するために、コンクリート中に静的破砕剤を充填して、劣化供試体を作成する手法がある。既存論文では、静的破砕剤を用いたひび割れ供試体も、電食によるひび割れ供試体とほぼ同様の傾向を示し、実際の損傷メカニズムに対して、妥当であることが報告されている。本研究では、上記の知見等を参考として様々な損傷状態の供試体を作成するものとした<sup>9)</sup>。
- ・鋼球落下試験により得られた健全部の周波数分布は、広がりを持つ山なりの形状となる特徴を有することから、データ処理を行ったうえでのスペクトルパワーを積算し、その値を健全部や異常部の判定指標とする検討成果<sup>10)</sup>を参考として、新たな評価方法や閾値について検討するものとした。

## 5.4 閾値と評価方法の構築の検討方針

### (1) 検討方針

第1段階は、危険個所のスクリーニングを目的とし、レベルⅢ以上のうき・剥離が見落としなく（安全側）評価可能な評価方法や閾値の設定を目指す。第2段階は、うき・剥離箇所の正確な把握を目的とし、図-5.4.1に示すような健全箇所とうき・剥離箇所（レベル別）の正確な把握目的とした、より高度な評価方法や閾値の設定を目指す。



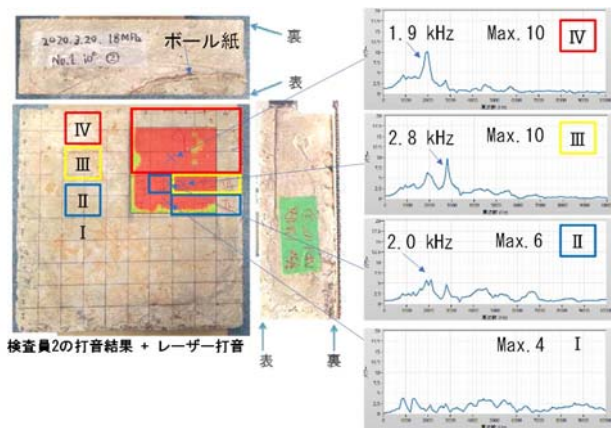


図-5.4.1 振動波形の形状に着目したうき・剥離箇所のレベル別判定のイメージ

## 5.5 従来手法による閾値と評価方法の構築

### (1) 現在の欠陥判定手法

現在、研究が進められている従来手法は、ピーク強度比法と周波数面積法（スペクトル面積比法）である<sup>11)</sup>。ピーク強度法は、式(5.4.1)で求められ、スペクトル平均強度に対するスペクトル最大強度の比がある値を越えたら、欠陥と評価する方法である。

$$Rsp = I_{peak}/I_{average} \quad (5.4.1)$$

$I_{peak}$  : 0~10kHz までのスペクトル最大強度

$I_{average}$  : 0~10kHz までのスペクトル平均強度

周波数面積法（スペクトル面積比法）は、式(5.4.2)で求められ、閾値となる周波数 X を定め、その周波数を境にした面積比で評価するものである。

$$Rsf = A_1/(A_1 + A_2) \quad (5.4.2)$$

$A_1$  : 0~X kHz までのスペクトル面積

$A_2$  : X~10kHz までのスペクトル面積

X : 閾値（実験データから決定する閾値）

本節では、製作した供試体に対する実験データに基づき、ピーク強度比法と周波数面積法のアルゴリズムを組み合わせることにより、スコアを算出する。供試体実験は、第4章で製作した28体について行い、人力打音の判定と合うように調整を行った。

### (2) 閾値の検討

損傷レベル別ピーク強度比法、スペクトル面積比法の適用性を検討した結果を図-5.5.1~図-5.5.4に示す。損傷レベル毎にピーク強度比の値とスペクトル面積比の値を算出し、人力打音（技術者判断）結果と適合率の高い閾値について検討した。トライアルの結果、ピーク強度比7.0未満、スペクトル面積比0.7未満（4.3kHzでA1とA2を分離）の場合に適合率が高かった。

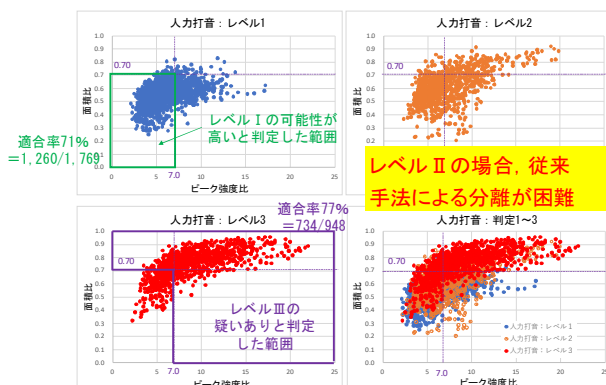


図-5.5.1 閾値検討結果 供試体 (中間部 部分 1本モノ CE01xx)

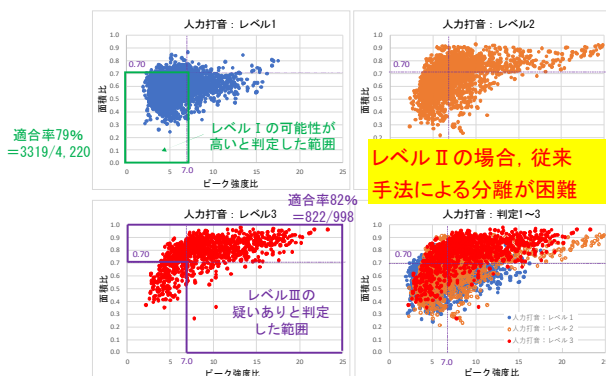


図-5.5.2 閾値検討結果 供試体 (中間部 全体 2本モノ CE02xx)

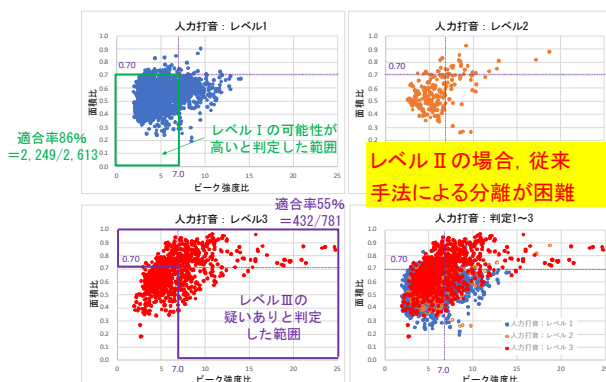


図-5.5.3 閾値検討結果 供試体 (隅角部 部分 GUxxxx)

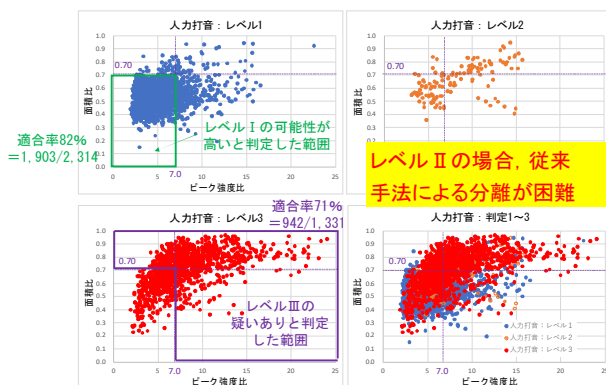


図-5.5.4 閾値検討結果 供試体 (隅角部 部分 GSxxxx)

### (3) 閾値や評価方法の検討

従来手法による閾値と評価方法の構築は、技術者判断による損傷レベルの判定箇所毎に、ピーク強度比の値とスペクトル面積比の値を算出して、損傷レベル（Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ）毎に従来手法の適合性を評価した。ピーク強度比は7.0未満、スペクトル面積比は0.7未満（4.3kHzでA1とA2を分離）を閾値とした場合、損傷レベルⅠと損傷レベルⅢの適合率はそれぞれ約8割と比較的高く、「ピーク強度比法」と「スペクトル面積比法」による判定は可能と考えられる。

一方、損傷レベルⅡの判定箇所に対するピーク強度比の値とスペクトル面積比の値には明確な傾向がみられず、判定するためには別の評価手法が必要であることも判明した。図-5.5.5に示すように、ピーク強度比とスペクトル面積比に着目した評価方法は、レベルⅠとレベルⅢは区分可能と考えられるが、レベルⅡとレベルⅢの分離は従来手法では難しいため、新たな評価方法として減衰波形に着目した手法を提案した。

### (4) 閾値の検討に用いた供試体データ

各供試体（全28供試体）における「AI打音チェッカーを用いた人力打音」、「鋼球落下試験による調査」、「レーザー打音装置を用いた調査」、「技術者による人力打音」の調査結果をエクセルファイルに整理した。本論文では整理結果の一部を図-5.5.6～図-5.5.17に例示する。

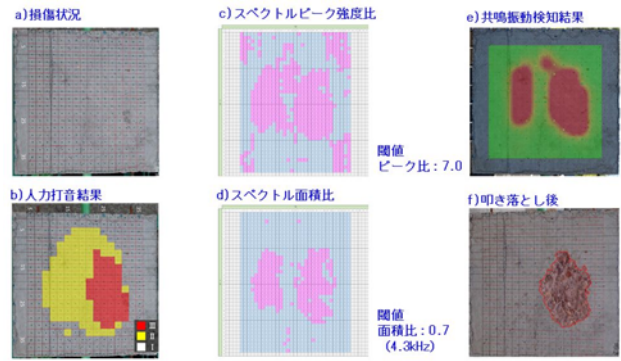


図-5.5.6 判定結果 供試体  
(中間部 部分 1本モノ CE0101)

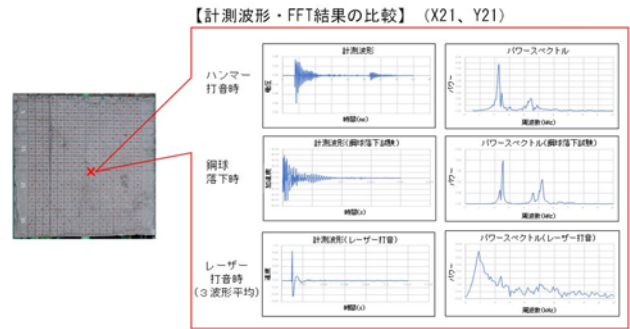


図-5.5.7 計測結果一例 供試体  
(中間部 部分 1本モノ CE0101)

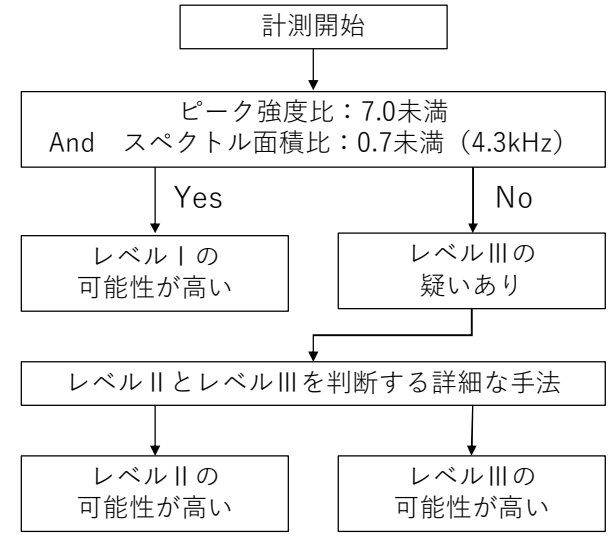


図-5.5.5 従来手法と新規手法による判定イメージ

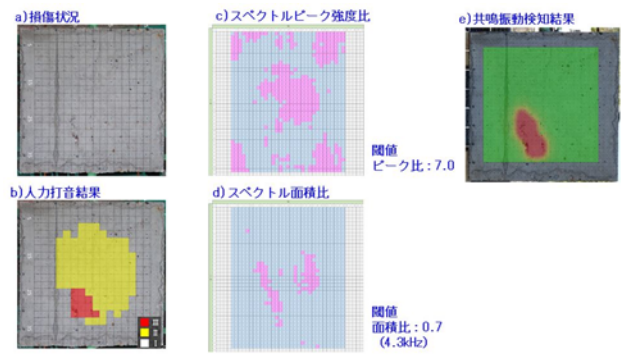


図-5.5.8 判定結果 供試体  
(中間部 部分 1本モノ CE0102)

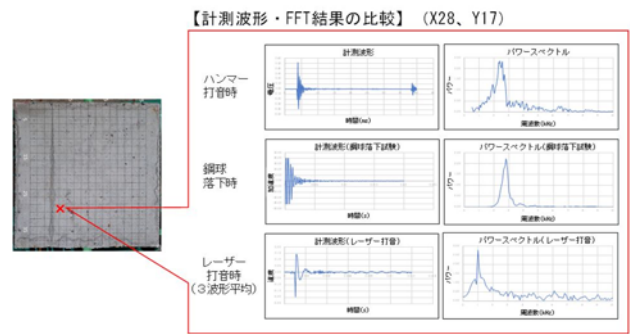


図-5.5.9 計測結果一例 供試体  
(中間部 部分 1本モノ CE0102)

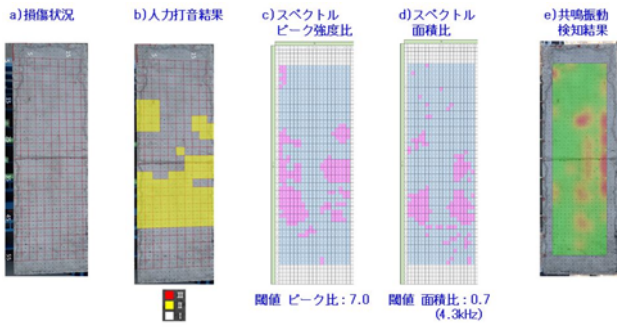


図-5.5.10 判定結果 供試体  
(中間部 全体 2本モノ CE0201)

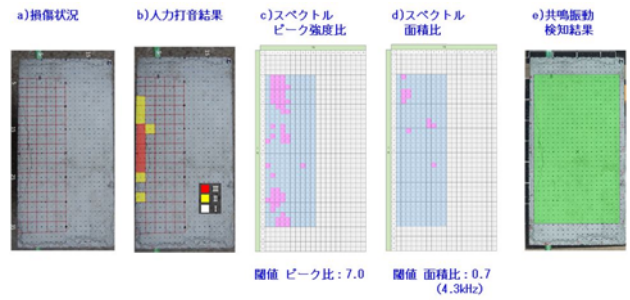


図-5.5.14 判定結果 供試体  
(隅角部 部分 GU3101)

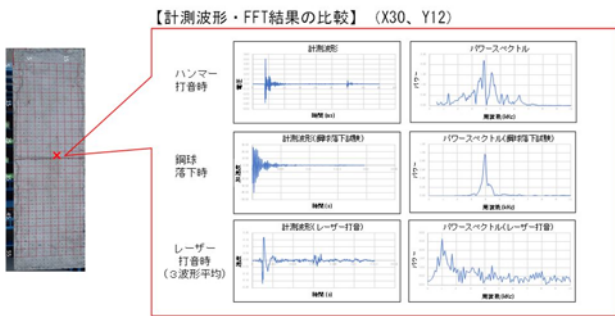


図-5.5.11 計測結果一例 供試体  
(中間部 全体 2本モノ CE0201)

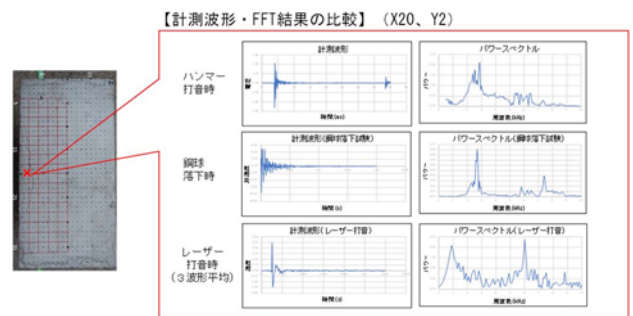


図-5.5.15 計測結果一例 供試体  
(隅角部 部分 GU3101)

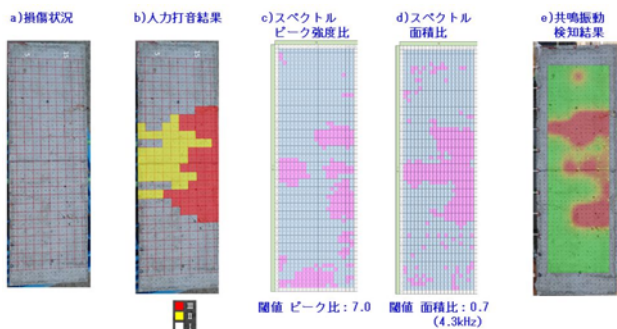


図-5.5.12 判定結果 供試体  
(中間部 全体 2本モノ CE0202)

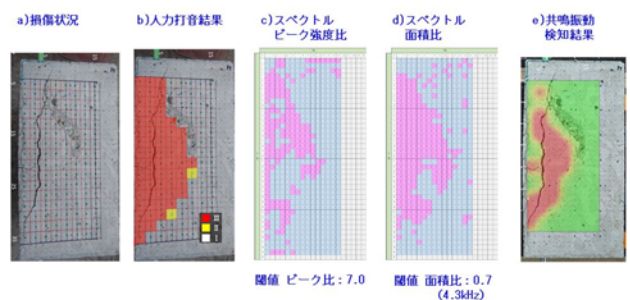


図-5.5.16 判定結果 供試体  
(隅角部 部分 GU3202)

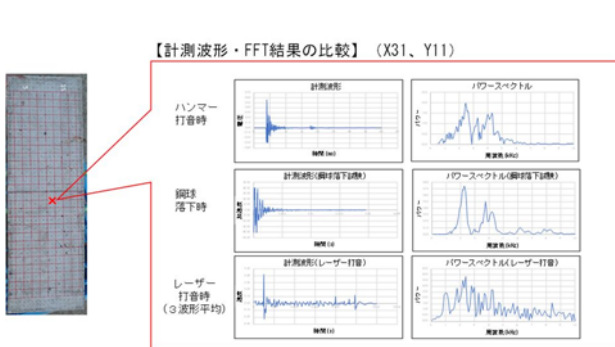


図-5.5.13 計測結果一例 供試体  
(中間部 全体 2本モノ CE0202)

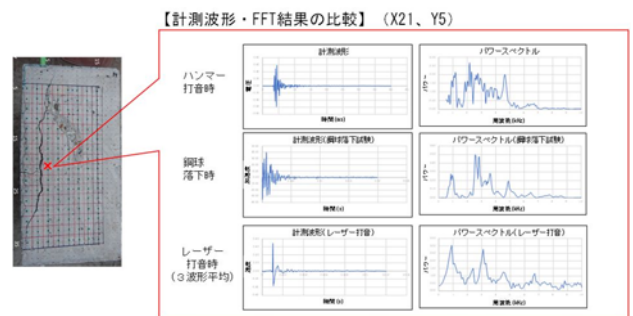


図-5.5.17 計測結果一例 供試体  
(隅角部 部分 GU3202)

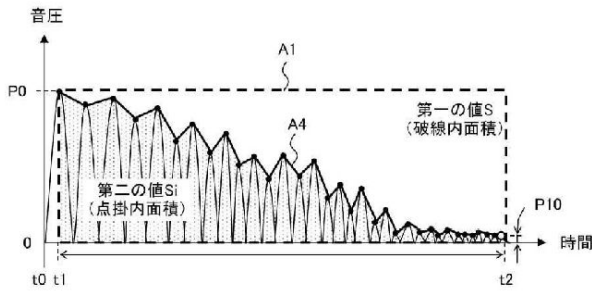


図-5.6.1 減衰波形による評価方法<sup>12)</sup>

## 5.6 本研究で構築した閾値と評価方法

### (1) 減衰波形による評価

レベルⅡとレベルⅢを分離する新しい評価方法として、減衰波形を用いた評価を立案した。減衰波形は、振幅が収まるまでの時間に着目した波形であり、これまでも研究が進められている。例えばネクスコ東日本エンジニアリングの特許<sup>12)</sup>では、図-5.6.1に示すようにグラフの縦軸を音圧の振幅として、所定時間に囲まれた面積で評価する方法が発明されている。この方法では、減衰波形の収束までに取得できる音圧の積分値の大小により、損傷の有無を評価できることが示されている。

### (2) 本研究で構築した評価方法

本研究では、損傷の有無に加え、内部損傷の状態を明らかにするために、「減衰の過程」に着目した。具体的には、振幅の積分値で正規化した「正規化波形エネルギー積算値面積」と時間の関係に着目し、正規化された振幅の積分値に至るまでのプロセスをグラフで表すことにより、「減衰の過程(損傷度の状態)」を評価することを立案した。正規化波形エネルギー積算値面積は、式(5.6.1)により、算出することができる。

$$ATT(t) = \sum_{i=0}^t \frac{wave(i)^2}{\sum_{j=0}^{0.005} wave(j)^2} \quad (5.6.1)$$

$i$ : 0~ $t$  までの振幅

$j$ : 0~0.005s までの振幅

図-5.6.2は、式(5.6.1)によって作成されるグラフである。青い線は健全部、赤い線は損傷部を示し、減衰振動が収まるまでに時間を要することを正規化波形エネルギー積算値面積で評価することが可能となる。また、このとき、正規化波形エネルギー積算値曲線(以下、減衰グラフ)で囲まれた面積は、その反対側のY軸と囲まれた面積(コンプリメンタリ面積)を使い、変化の違いが数値に反映されやすい処理を行っている(以下、Y軸100%面積)。このY軸100%面積は、健全部で小さく、損傷が大きくなる(減衰波形の収束に時間がかかる)ほど大きくなるため、この面積の大きさを評価することで、損傷の状態を評価することができる。

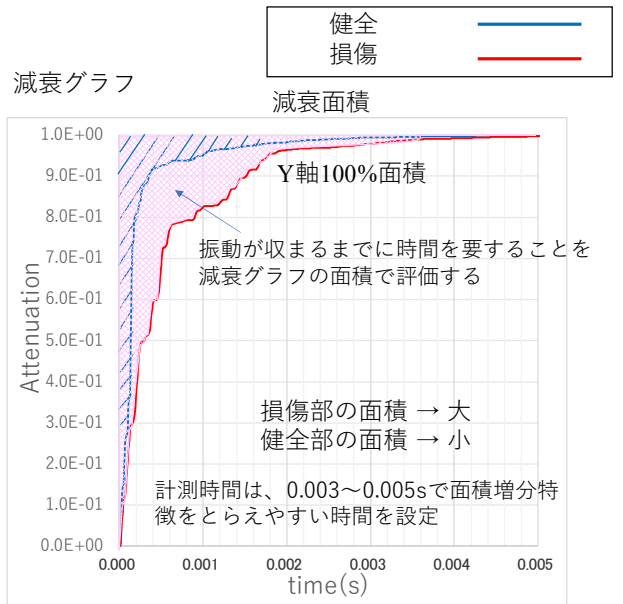


図-5.6.2 正規化波形エネルギー積算値面積を用いた損傷の評価方法

### (3) グラフのプロセス評価

本評価方法の特徴は、正規化された振幅の積分値に至るまでのプロセスを評価することができることである。第4章の供試体実験により、損傷度と代表的な減衰グラフ形状の関係性を図-5.6.3に示す。これによれば、損傷度の大きさは、減衰グラフの立ち上がりの勾配の変化点で示すことができ、損傷度が大きいほど、勾配の変化点のY軸値が小さくなる傾向が確認できる。

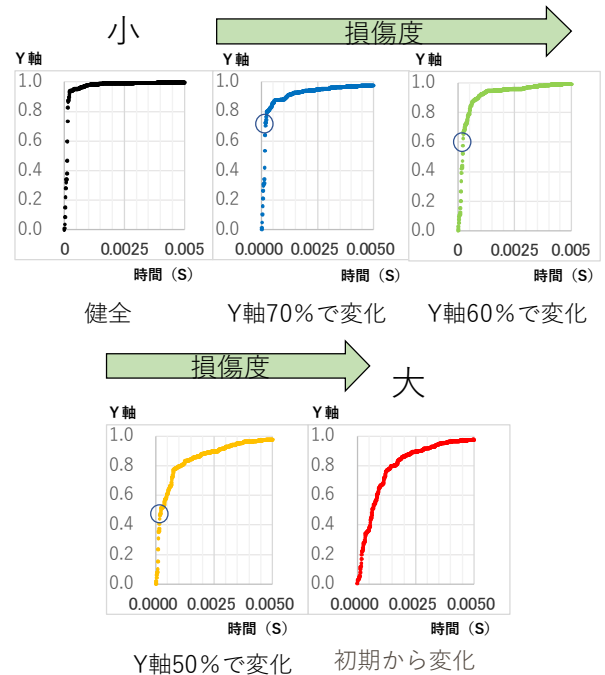


図-5.6.3 正規化された振幅の積分値に至るまでのプロセス評価

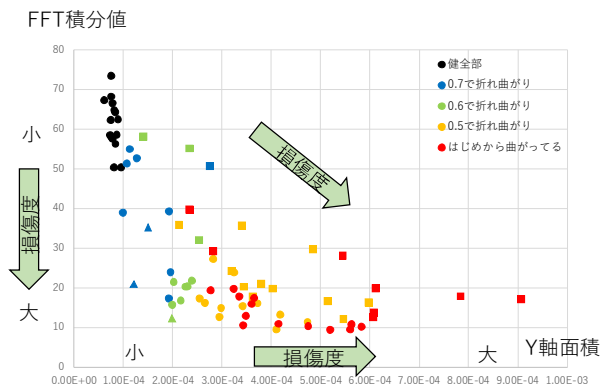


図-5.6.4 減衰グラフプロセス形状とFFT積分値との相関性

#### (4) 減衰グラフとFFT積分値との相関性

減衰グラフは、図-5.6.3で分類した形状に基づき、「健全」、曲がり始めが「0.7~0.8」「0.6~0.7」「0.6未満」「初めから曲がっている」の5種類に分類し、その分布図を図-5.6.4に示す。

その結果、同じ振動値を従来の方法でFFT積分した値と減衰グラフは良い相関性を確認した。

#### (5) 損傷度の確認

本評価方法について、損傷度評価の妥当性を確認するため、第4章で製作した供試体とは別に人為的に損傷度を変化させた供試体で妥当性を確認した。損傷度は、図-5.6.5に示す供試体を用いて、静的破砕剤の膨張時間を任意に変化させることで、損傷度の違いを再現する。静的破砕剤は、48時間(2日)まで膨張が顕著<sup>9)</sup>であることから、1.25日、1.75日、6.25日経過した時点で、供試体表面の振動値を計測し、供試体を切断することで、Y軸100%の値と内部損傷の変化の関係性を確認した。

供試体実験の結果は、図-5.6.6~図-5.6.8に示すとおり、時間が経過し静的破砕剤の膨張量が大きくなると内部損傷のひび割れ幅が大きくなり、Y軸100%の値も大きくなることが確認された。また、損傷が大きくなり、剥離が進行すると開口面の影響を受け、Y軸100%面積の増加量に変化がないことも考察された。



図-5.6.5 損傷度を評価する供試体

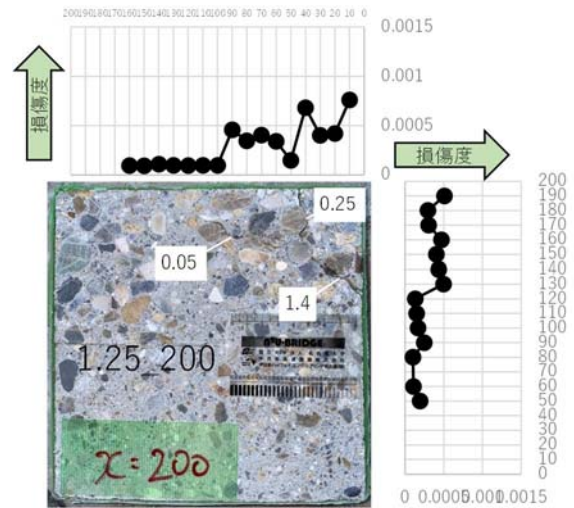


図-5.6.6 1.25日が経過した供試体

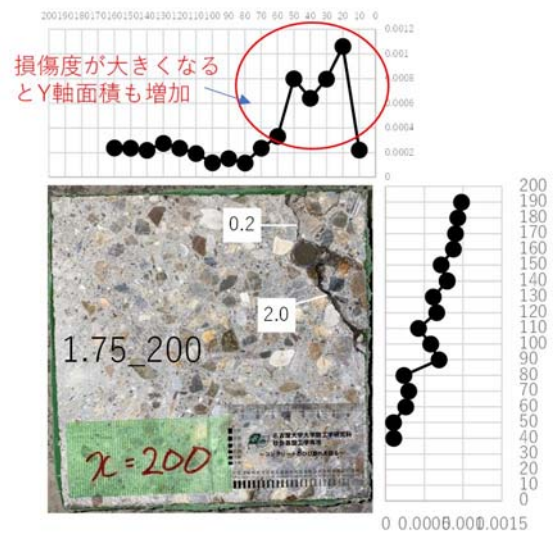


図-5.6.7 1.75日が経過した供試体

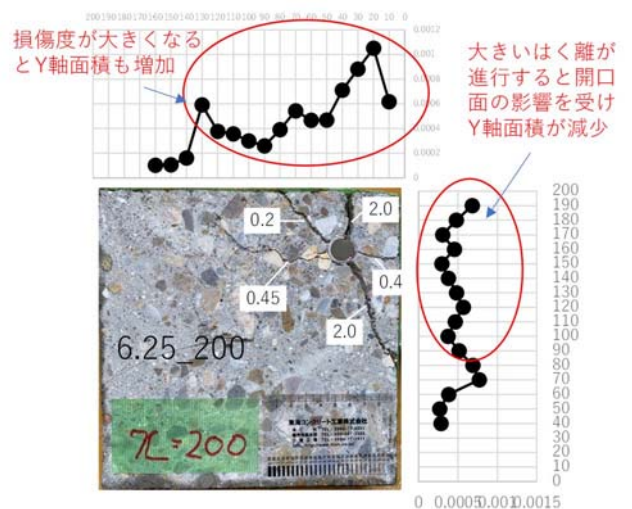


図-5.6.8 6.25日が経過した供試体

## (6) 面的評価法の検討

レーザー打音検査装置は、はじめに設定したピッチで計測していくため、健全部も計測する。健全部表面の付着物に計測用レーザーがあたると振動し損傷部と評価されることがあるが、面的な評価を採用することで、これらのデータを取り除くことができる。また、レーザー打音検査装置の速度を向上するためには、ピッチを広げる必要があるが、ピッチを広げると計測間隔が広がり、面的な広がりをもった損傷範囲が点で示されることになる。面的な評価を採用することで、ピッチを広げた状態でも面的な損傷範囲を示すことができると考えた。

レーザー打音検査装置の計測ピッチは、5cm以上に広げると人力打音と同等以上の点検精度が確保できないため、計測ピッチは最大5cmとして、面的な評価ができるように設定した。計測ピッチが3cmの場合は、面的範囲は計測点を中心に1.5cm範囲、計測ピッチが5cmの場合は、面的範囲は計測点を中心に2.5cm範囲となる。図-5.6.9は、9点に対する重みづけを説明したものである。中心のA点に対して、レーザー打音検査装置が計測した点に応じた距離で除した値を重みとして考慮する。重みは、式(5.6.2)で示される。この場合、Aの重みを1とすると、B～Eの重みは1/2.5、F～Iの重みは1/2.5√2となる。

このようにAの周辺の計測値を距離に応じた重みづけをして補正した値を用いて面的なコンタ図で計測した結果を表示する。その結果を図-5.6.10に示す。面的評価法の無い図-5.6.10(a)に対して、面的評価法の処理を行った図-5.6.10(b)は、より損傷範囲をなめらかに表示することができ、人力打音の検査結果とも近い範囲を示すことができることを確認した。

$$A = \frac{\sum_{i=A}^A \text{指標値}_i + \sum_{i=B}^E \frac{1}{2.5} \text{指標値}_i + \sum_{i=F}^I \frac{1}{2.5\sqrt{2}} \text{指標値}_i}{\sum_{i=A}^A 1 + \sum_{i=B}^E \frac{1}{2.5} + \sum_{i=F}^I \frac{1}{2.5\sqrt{2}}} \quad (5.6.2)$$

i: 0～t までの振幅

j: 0～0.005s までの振幅

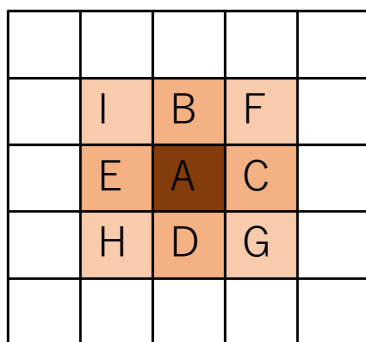


図-5.6.9 9点による面的評価の概要図

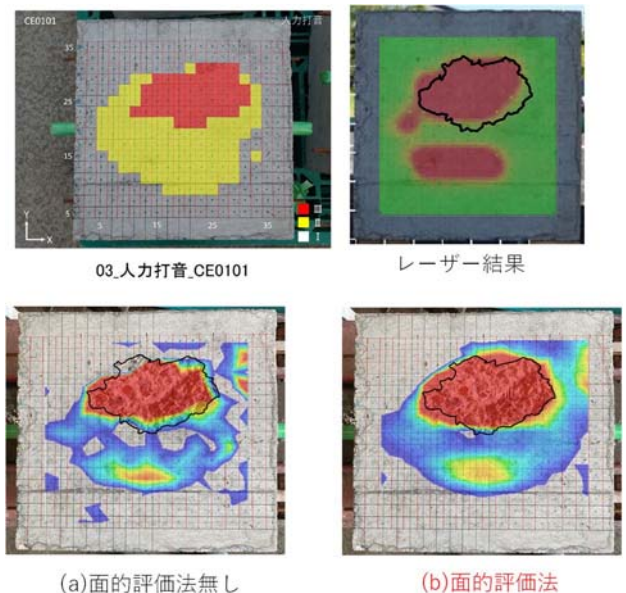


図-5.6.10 面的評価法の出力結果

## (7) レーザー打音検査装置の計測結果と切断面の評価

図-5.6.11は、CE0101供試体について、レーザー打音検査装置の計測値から減衰グラフでY軸100%面積を計算し、面的評価法でコンタ表示したものである（以下、減衰グラフ評価法）。その結果、減衰グラフ評価法のレベルⅡ、レベルⅢの範囲は、人力打音検査結果、供試体切断面と非常に良く整合する。また、石刀ハンマーで叩き落としを実施したところ、レベルⅢ（すぐに叩き落とさなければならぬ危険なうき・剥離）と評価した範囲のみ叩き落とされる結果となった。これにより、減衰グラフ評価法は、コンタ表示することで、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。なお、レベルⅡの範囲においても供試体切断面において、幅0.6mm、深さ30～40mm程度のひび割れを確認している。本供試体において、減衰グラフ評価法のコンタ表示レンジと人力打音結果、供試体切断面の範囲が非常に良い整合性を示したことから、本研究における供試体実験のコンタ表示レンジは、CE0101供試体に合わせるものとした。

図-5.6.12は、CE0102供試体の結果である。その結果、減衰グラフ評価法のレベルⅢ範囲は、人力打音検査結果、供試体切断面と良く整合した。一方、減衰グラフ評価法において、レベルⅡの範囲で検出されていない範囲が確認された。この範囲の損傷は、端部から150mmの位置の供試体切断面で確認すると幅0.6mm、深さ30mm程度のひび割れを確認した。この損傷の一部を減衰グラフ評価法が健全と評価したことが原因であるが、供試体切断時にひび割れの範囲が広がったことも考えられる。

図-5.6.13は、CE0201供試体の結果である。その結

図-5.6.13は、CE0201供試体の結果である。その結果、減衰グラフ評価法のレベルⅡ範囲は、人力打音検査結果、供試体切断面と良く整合した。減衰グラフ評価法において、パイプに挟まれた中間部の検出ができていないが、その範囲はひび割れが深くなり、剥離体が大きくなっているため、レーザー打音検査装置では励起力が小さかったことが原因と想定される。一方、中間部以外のひび割れが表面に近くなっている範囲は、減衰グラフ評価法で検出することが

できている。石刀ハンマーによる叩き落としを行った結果、レベルⅡの範囲でも叩き落とすことができている。これは、石刀ハンマーによる打撃で内部のひび割れが進展したことが、また、供試体端部に近くひび割れが貫通したことが原因と想定される。

図-5.6.14は、CE0206供試体の結果である。その結果、減衰グラフ評価法のレベルⅡ、レベルⅢの範囲は、人力打音検査結果、供試体切断結果と良く整合した。

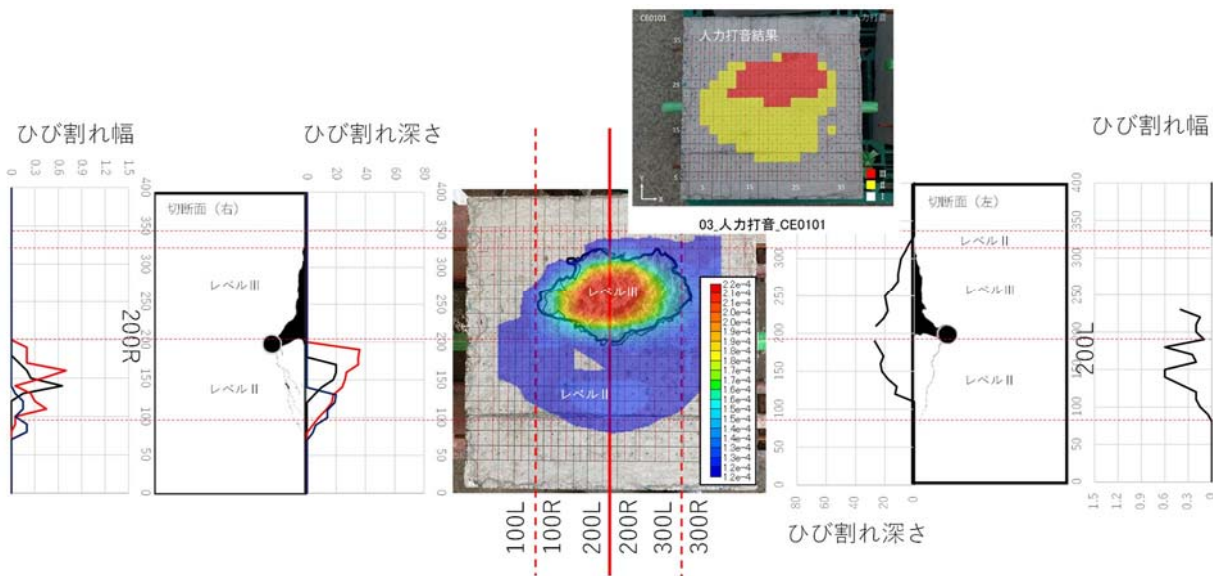


図-5.6.11 中間部1本供試体 CE0101-200 (叩き落とし有り)

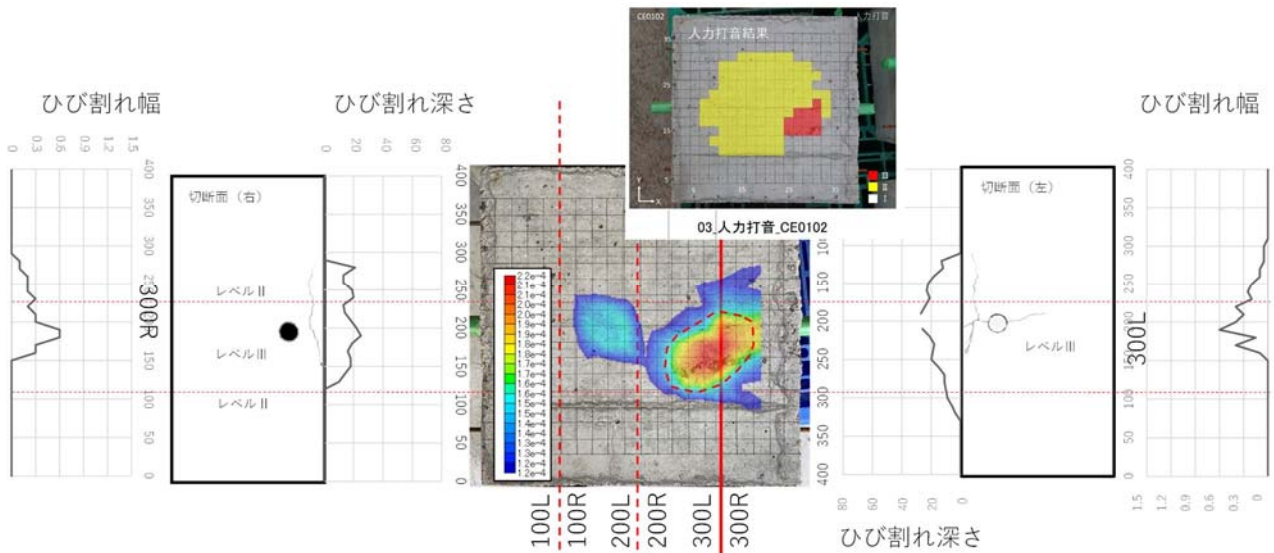
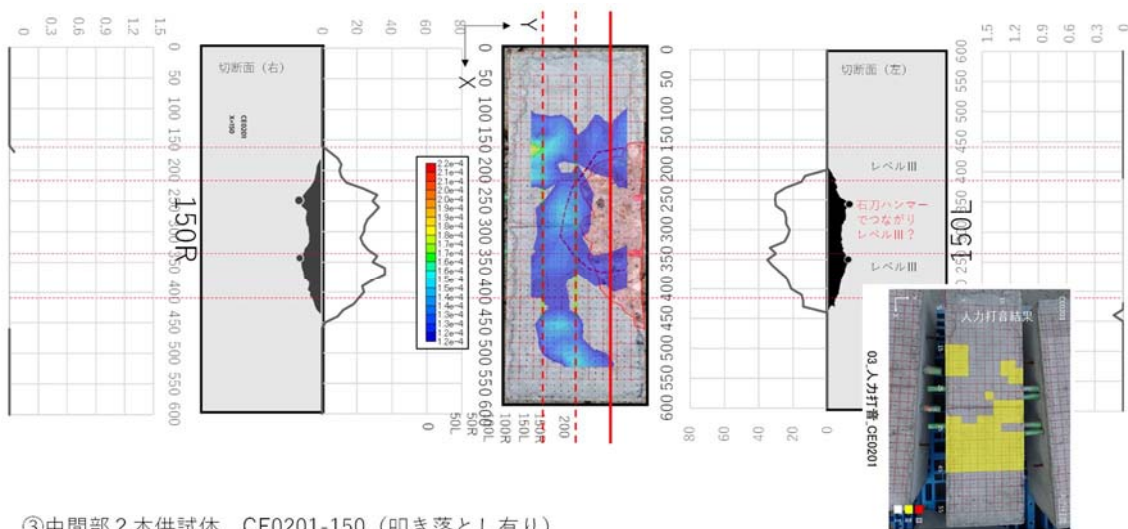


図-5.6.12 中間部1本供試体 中間部1本供試体 CE0102-300 (叩き落とし無し)



③中間部2本供試体 CE0201-150 (叩き落とし有り)

図-5.6.13 中間部2本供試体 CE0201-150 (叩き落とし有り)

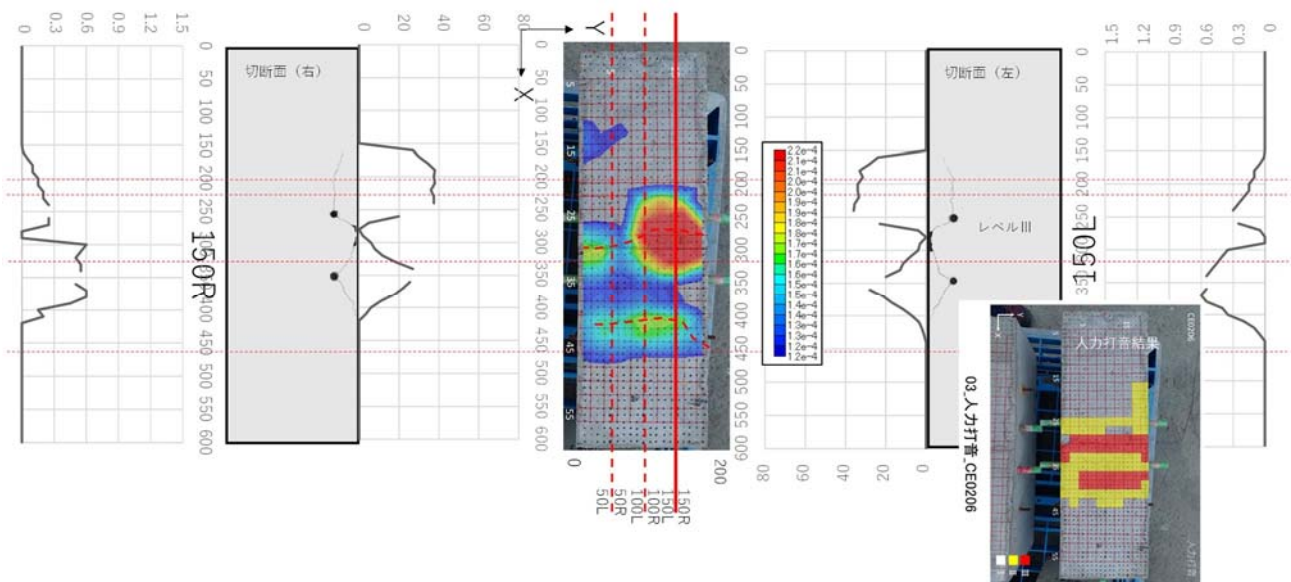


図-5.6.14 中間部2本供試体 CE0206-150

図-5.6.15は、G3101供試体の結果である。G3101は、減衰グラフ評価法及び人力打音検査の結果でもレベルⅡ、レベルⅢの範囲を確認しているが、石刀ハンマーで叩き落とすことはできなかった。上面のレベルⅡの範囲は、供試体切断面で確認すると、幅0～2.5mm、深さ0～40mm程度のひび割れを検出している。一方、側面のレベルⅡは、人力打音検査結果と供試体切断面のひび割れ範囲は整合するが、減衰グラフ評価法の検出範囲はズレが生じている。これは、平均化の影響により損傷範囲が大きく評価されると想定される。

図-5.6.16は、G3202供試体の結果である。その結果、上面の減衰グラフ評価法のレベルⅢ範囲は、人力打音検査結果、供試体切断面と良く整合する。一方、側面のレベルⅢの範囲で一部が検出できていない。これは、剥離ブロックが大きく、レーザー打音検査装置では、励起できなかったことが原因と想定される。

なお、本項では、中間部1本、中間部2本、隅角部の3タイプの供試体について、代表的な結果を示す。



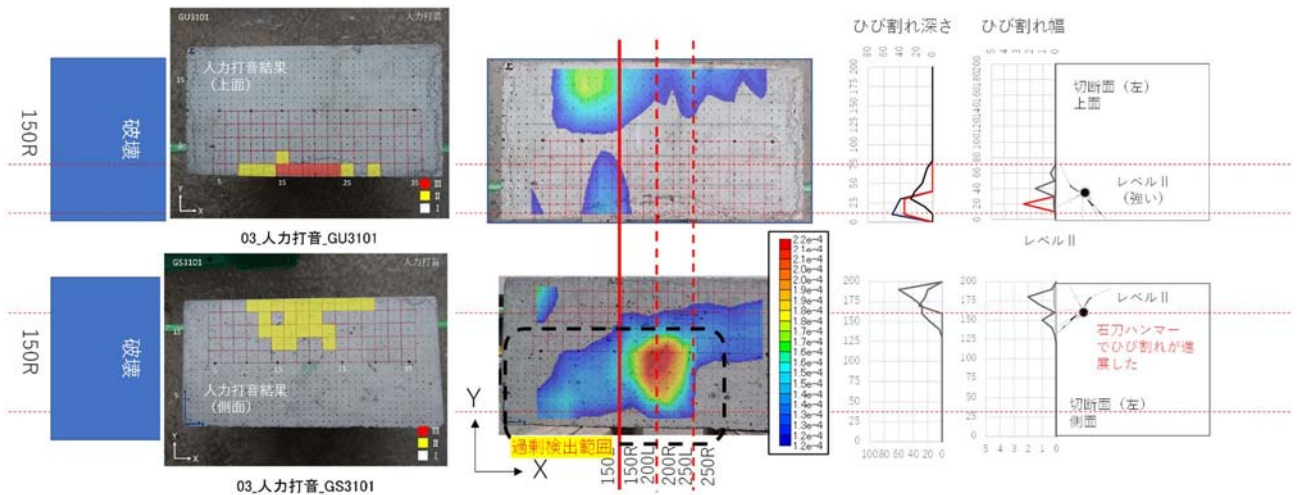


図-5.6.15 隅角部供試体 G3101-150

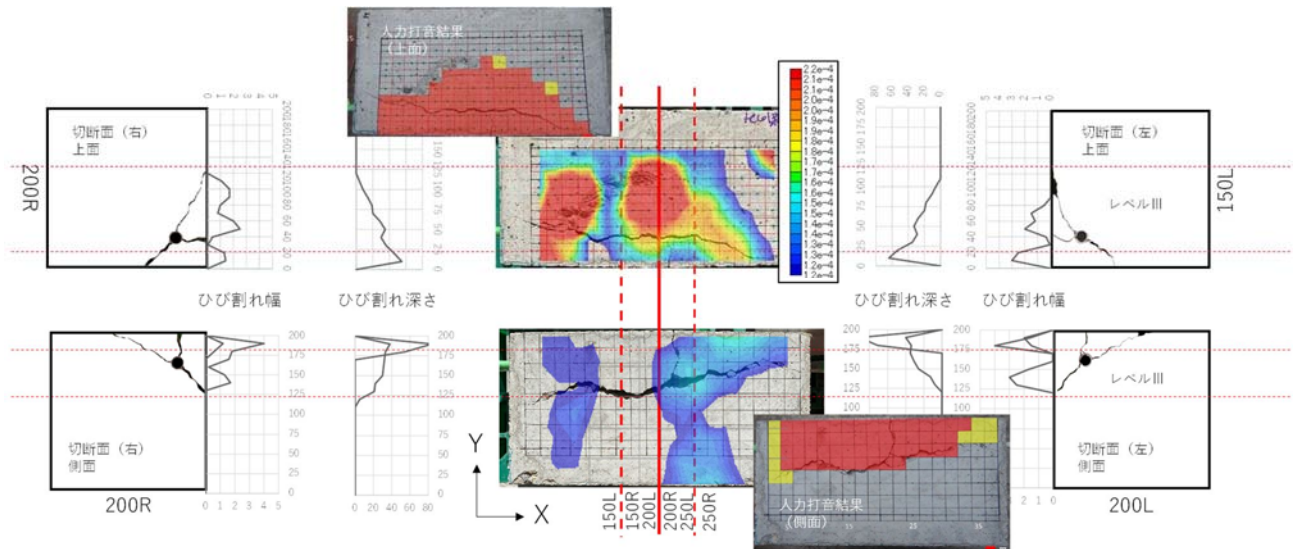


図-5.6.16 隅角部供試体 G3202-200

### (8) 閾値の設定と適合率の確認

閾値は、供試体実験の結果、減衰グラフ評価法、人力打音検査結果、供試体切断面と非常に良く整合したCE0101供試体を用いて設定する。

閾値は、人力打音検査結果を正として、CE0101の計測値を用いた結果との適合率が最大となるように、上限値（レベルIIとレベルIIIの閾値）、下限値（レベルIとレベルIIの閾値）を設定した。設定した閾値を図-5.6.17に示す。上限値は $1.555E-04$ 、下限値は $1.275E-04$ と設定し、その時の適合率は、レベルIIは81.97%、レベルIIIは64.52%となる。

CE0101以外の供試体の適合率は、レーザー打音検

査装置の計測点における人力打音検査結果のレベル判定へ計測値を区分し、CE0101で設定した閾値（上限値、下限値）から外れる計測点を適合していない点として計算した。

CE0102の計算結果を図-5.6.18に示す。閾値適用後、人力打音検査結果でレベルIIIと区分される計測点の値はすべて上限値を超えている。そのため、適合率は100%となる。一方、レベルIIの範囲は、下限値を下回るされる計測点が多く、適合率は13%に留まる。これは、減衰グラフ評価法の値が小さく、どちらかと言えば健全に近い値を示していることになる。この原因は、人力打音検査の結果、広くレベルIIと評

価された範囲のうち、減衰グラフ評価法がレベルⅡと評価した範囲が小さいためである。前項で記載したようにこの範囲の損傷は、幅0.6mm、深さ30mm程度のひび割れである。この損傷のうち、パイプ直上部のレベルⅢに近い範囲の損傷は計測できている。

CE0201の計算結果を図-5.6.19に示す。減衰グラフ評価法と人力打音検査結果ともにレベルⅢは確認されていないため、レベルⅢの適合率は評価できない。CE0102と同様な傾向を示し、人力打音検査結果でレベルⅡとなっている範囲の計測点は下限値を下回る（減衰グラフ評価法では健全と評価）計測点は多くなるが、パイプ直上や2本のパイプ中間部等の損傷が生じやすい範囲のレベルⅡの損傷を計測し、適合率は52%となる。

CE0206の計算結果を図-5.6.20に示す。人力打音検査結果でレベルⅢと区分される計測値は上限値を超えている計測点が多く、レベルⅢの適合率は69%となる。CE206は、CE0201に比べパイプ直上のレベルⅢの範囲が広がっていることが人力打音検査結果でも確認され、損傷が進んでいると考えられる。このため、CE0201とは異なり、レベルⅡの範囲でも上限値を越えている計測点が多くなり、減衰グラフ評価法ではレベルⅢと評価している範囲が多くなり、レベルⅡの適合率が20%となる。

このように、損傷が進んでいる供試体では、レベルⅢに近い評価が多くなり、結果としてレベルⅡの適合率が低くなっているが、安全側の評価となっていることが確認された。

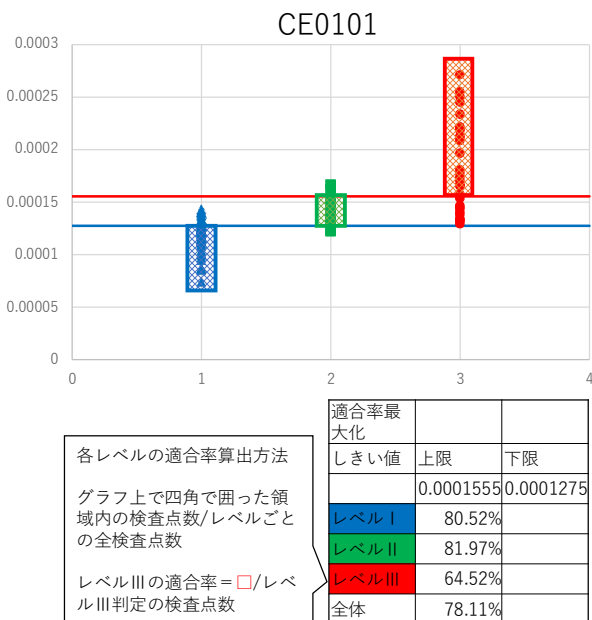


図-5.6.17 CE0101供試体による閾値と適合率の設定

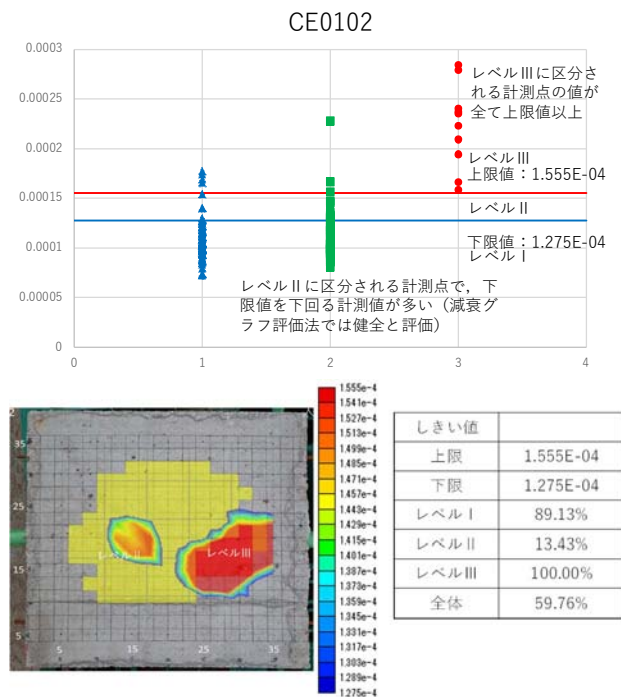


図-5.6.18 CE0102供試体による適合率の確認

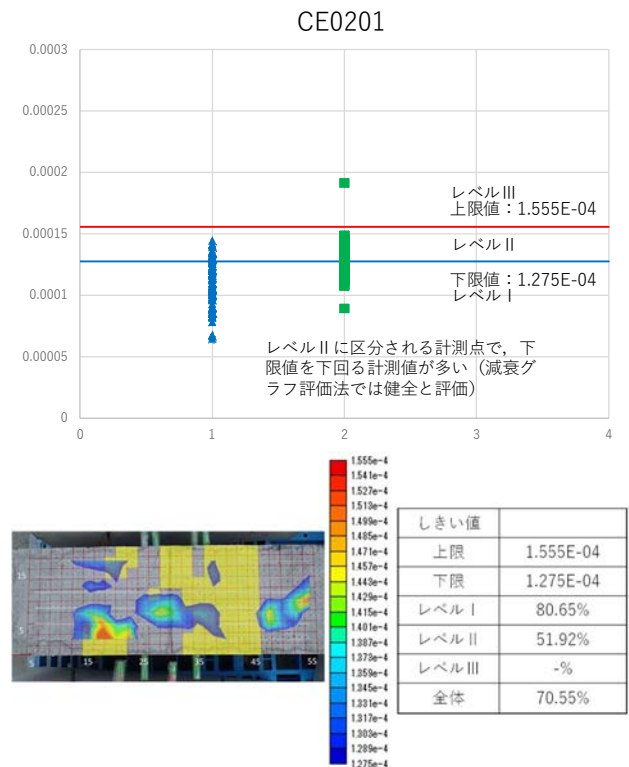


図-5.6.19 CE0201供試体による適合率の確認

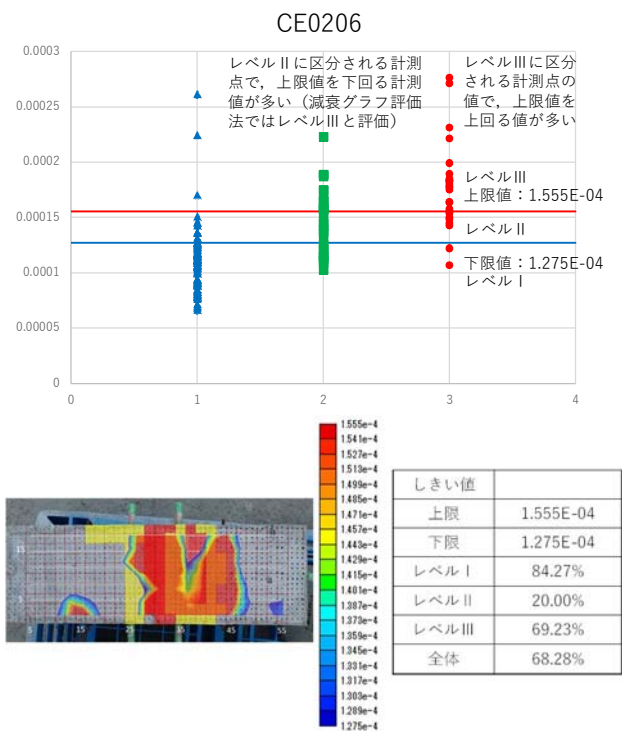


図-5.6.20 CE0206供試体による適合率の確認

## 5.7 記録様式の検討

### (1) 検討時の着目点

前項までの供試体実験による閾値の検討内容を踏まえ、コンクリート構造物のうき・剥離箇所を把握、記録し、第三者被害の発生リスクを定量的データに基づき評価でき、発生リスクに基づき適切なタイミングで叩き落としを実施するための記録方法、様式について検討する。

### (2) トンネル構造物

本項目では、名津佐トンネルでの実証実験の結果を踏まえ、第三者被害の発生リスクを定量的データに基づき評価するためのトンネル覆工コンクリートの目地部におけるデータ記録方法を検討する。現在の調書では、覆工スパン別変状詳細展開図で目地部の損傷に対する診断結果を確認することができるが、前回定期点検時の健全性の判定に関する情報が少なく、前回の点検時に比べて劣化が進行しているか評価することができない。

覆工表面のうき状況等も画像で残されているが、画像データを見比べるだけでは、損傷の進行を評価することが難しい。

この課題に対し、図-5.7.1に示すようにMIMMによる走行画像にレーザー打音検査装置の計測結果を重ね合わせたコンタ図と、その元になっている計測データを記録しておくことで、前回点検のデータとの

比較検証が可能となり、劣化の進行性が判断できる。このとき、以下の点に留意する必要がある。

- ・レーザー打音検査装置は、目地半断面を連続して計測することができない。目地の高さ方向に40～60cm刻みで計測範囲を設定していく必要がある。このため、目地を計測エリアに区分し、そのエリアNo.とともに計測値を記録しておくことが重要である。
- ・計測位置（レーザー照射位置）が変わると、計測値を比較することが困難となるため、計測位置を正確に記録し、再現可能とすることで、過年度の点検データとの相対比較が可能となる。レーザー照射位置は、トンネル断面における覆工壁面からのレーザー打音検査装置の離れと路面からの高さで決定されることから、リアルタイムで計測する測定装置をレーザー打音検査装置に搭載しておくことが効率的である。

### (3) 橋梁構造物

本項では、浜名大橋での実証実験の結果を踏まえ、第三者影響範囲におけるデータ記録方法を検討する。現在の記録様式では、「橋梁における第三者被害予防措置要領（案）」（平成28年12月国土交通省道路局国道・防災課）に基づき、損傷図及び損傷写真を記録している。なお、ここでの記録はあくまで、うきなどの第三者被害が懸念される損傷に対し、叩き落としを実施し、落ちたか落ちなかったかを記録するもの（措置の記録）であり、うき自体の進行性を把握するための記録ではない。どちらかと言えば、定期的に第三者被害予防措置を実施（2～3年に1回）していることを示す記録である。

そのため、うき自体の損傷が前回の点検と比較して進行しているのか、また今後も進行する可能性がある（第三者被害に繋がる恐れがある）のかは、この記録様式では確認することができない。

既存の点検様式に対し、損傷写真にレーザー打音検査装置の計測結果を重ね合わせたコンタ図とその元になっている計測データを記録しておくことで、前回点検のデータとの比較検証が可能となり、劣化の進行性が判断できる。このとき、以下の点に留意する必要がある。

- ・橋梁構造物は、トンネル構造物に比べ形状が複雑であり、橋梁の種類によっても形状が大きく異なる。このため、図-5.7.2に示すようにレーザー打音検査装置により計測した箇所を示すため、BIM/CIMモデルを活用することが効率的である。
- ・また、トンネル構造物と同様に計測位置が変わると、比較することが困難となるため、計測位置を正確に記録し、再現可能とすることで、過年度の点検データとの相対比較が可能となる。

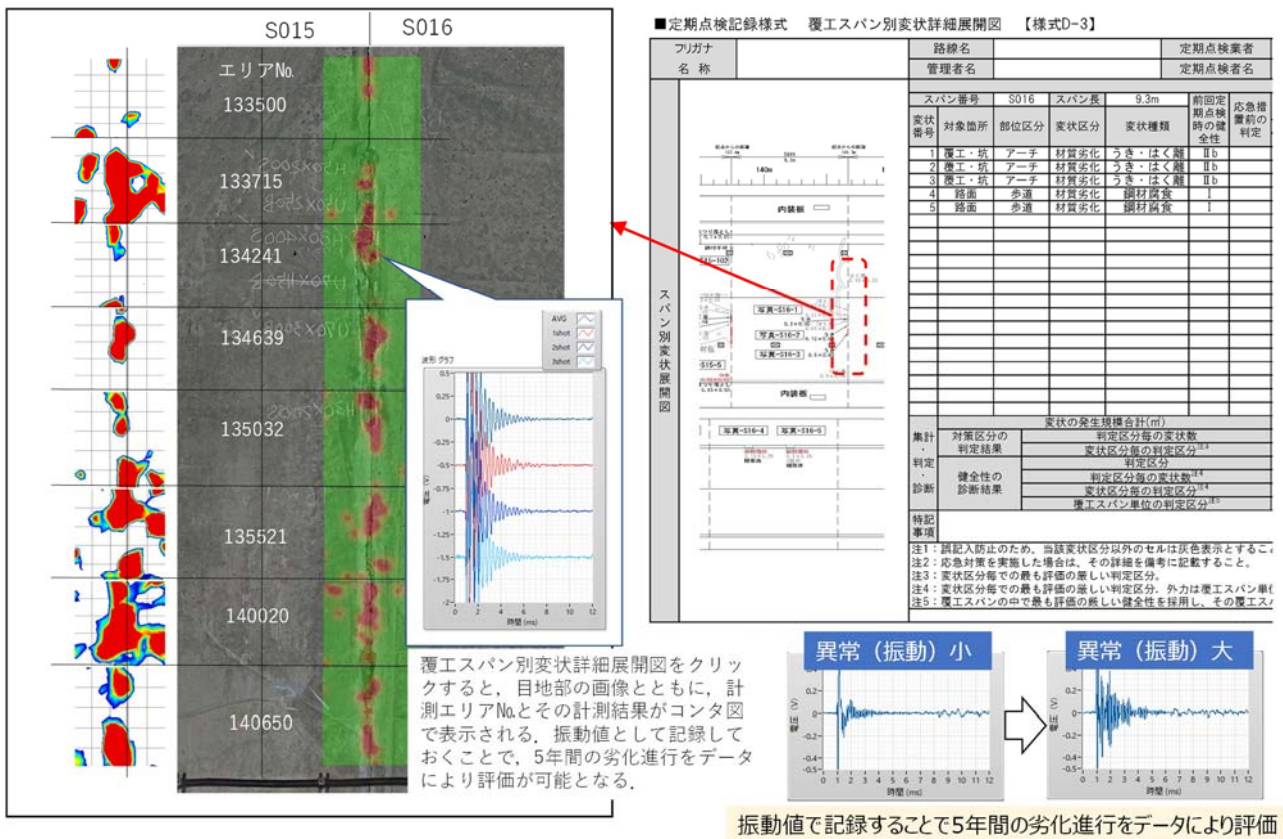


図-5.7.1 トンネル点検における記録様式の提案



図-5.7.2 橋梁点検における記録様式の提案

## 5.8 点検業務への導入に向けた手順・指針を作成するための基礎資料とりまとめ

### (1) 概要

本項目では、レーザー打音検査装置をトンネル点検、橋梁点検へ導入していくにあたり、その計測に必要な手順や指針を整理する。具体的には、本研究において、名津佐トンネルと浜名大橋でのレーザー打音検査装置の社会実装を行っていることから、その実施状況を踏まえ、レーザー打音検査装置による点検作業の流れ、適用範囲等を検討する。

### (2) レーザー打音検査装置の適用範囲

レーザー打音検査装置は、走行しながら計測することが出来ないため、ストップ&ゴーの計測が基本となる。このため、トンネル覆工内での計測を考えた場合、覆工全面を計測するのではなく、トンネル点検作業で多くの時間を要している目地部に対して適用し、「うき・剥離の状態」を定量的データ化し、劣化の進行性を評価することで、維持管理サイクルの効率性が向上することが可能となる。具体的には、従来点検の前にレーザー打音検査装置による計測を行い、劣化が進み叩き落としが必要と判断される範囲のみを人が診断し、叩き落とし作業を行うことで、従来点検の時間短縮が可能となる。

本研究において、MIMMとのデータ連携を行うことで、レーザー打音検査装置の照射範囲、打音ピッチの調整を行い、レーザー打音検査装置の計測時間の短縮を実現している。当初は従来点検の4.2倍必要だった時間が2.2倍まで短縮できているが、機器の改良により更なる時間短縮が望まれる。

橋梁点検は、レーザー打音検査装置から計測の対象となるコンクリート面までの距離が長いこと、**図-5.8.1**に示すように停車したレーザー打音検査装置の照射位置からコンクリート表面の照査可能範囲が広く取ることができる。このため、上部工の床版面の中心付近にレーザー打音検査装置を停車させることで、車両を移動しなくても幅広い面を計測することが可能であることから、従来点検に比べ、点検時間の短縮が期待される。本研究では単発のレーザー照射になっていることから、ラスタースキャン化することで、レーザー打音検査装置の計測時間の大幅な短縮が期待できる。人力打音では、高所作業車のリフト作業、移動時間などが必要になることから、人力打音よりも検査時間が短縮できると考えられる。

### (3) レーザー打音検査のピッチと検出精度

レーザー打音検査装置の時間は、照射ピッチの影響を受ける。照射ピッチを大きくすれば計測時間は短くなるものの、損傷範囲の検出精度が低下する。本研究においては、照射ピッチと検出範囲の検討をした結果、50mm幅の欠陥では、同程度以下の打音間

隔が必要であることを確認している（2.9参照）。

### (4) レーザー打音検査装置の点検作業の流れ

トンネル覆工コンクリートの目地部にレーザー打音検査装置を適用する場合、以下の点検作業の流れとなる。

- STEP①：MIMMによる走行画像から、レーザー打音検査装置の障害物となる施設の位置情報データを自動で抽出する
- STEP②：MIMMによる走行画像から、打音検査を密に実施するひび割れ密集範囲等の位置情報データを自動的に抽出する
- STEP③：ソフトウェアにより、様々なうき・剥離の検出精度向上に必要となるレーザー打音ピッチを自動で設定する
- STEP④：STEP③のデータをレーザー打音検査装置へ伝送する
- STEP⑤：レーザー打音検査装置による計測
- STEP⑥：叩き落としが必要と診断された範囲（レベルⅢ）、叩き落としまでは不要であるが内部損傷が確認された範囲（レベルⅡ）について、従来点検を実施する

橋梁の床版コンクリート面にレーザー打音検査装置を適用する場合、以下の点検作業の流れとなる。

- STEP①：レーザー打音検査装置に据え付けられた望遠レンズ付きのカメラを用いて、計測範囲を確認する
- STEP②：計測範囲に計測用のレーザーを照射し、励起位置が損傷部に対して適切な位置かを確認する
- STEP③：レーザー打音検査装置による計測を行う。このとき、励起しない状態で橋梁の振動値（交通荷重等による）を計測し、コンクリート表面の振動値を補正する
- STEP④：叩き落としが必要と診断された範囲（レベルⅢ）、叩き落としまでは不要であるが内部損傷が確認された範囲（レベルⅡ）について、従来点検を実施する



図-5.8.1 レーザー打音検査による橋梁点検イメージ

### (5) トンネル点検におけるレーザー打音検査装置の安全管理

トンネル点検においては、以下の安全管理が必要となる。また、図-5.8.2にトンネル点検における安全管理区域の考え方を示す。

- ・JIS C 6802（レーザー製品の安全基準）に則り、操作や安全対策を講じる。
- ・レーザー安全管理者を配置する。
- ・レーザー照射時に発生する散乱光の強度が人間の目に障害を及ぼす可能性が高い強度（クラス3）以上となる範囲を「レーザー管理区域」に指定する。レーザー打音検査装置では、照射位置から3m以内が「レーザー管理区域」となる。
- ・レーザー打音検査装置操作時はレーザー管理区域内への第三者の立入を防止するため、その範囲内をカラーコーンなどで囲うとともに、「レーザー管理区域」と明示する。
- ・レーザー管理区域内で作業を行う場合は、レーザーの波長の光を減少させるレーザー保護眼鏡を着用する。
- ・作業範囲内は常に整理整頓を心掛けるとともに、調査終了時には忘れ物がないか、作業員全員で確認する。

- ・トンネル天頂部を計測する場合、対向車のドライバー目線にはレーザー管理区域に該当しないが、万が一のリスクを考慮し規制切り替え時等、対向車が走行していないタイミングで計測を行う。

### (6) 橋梁点検におけるレーザー打音検査装置の安全管理

橋梁点検においては、前項のトンネル点検と同様の安全対策となるが、それに加え、橋梁の構造形式や立地環境に応じた安全管理が必要となる。

- ・コンクリート部材以外の鋼部材や添架管、排水管、架線等の付属物への照射を防ぐため、照射する際は必ず照射範囲を目視確認する。
- ・交通量が多い橋梁に対しては、活荷重による常時振動の影響が懸念されるため、夜間作業の可能性も視野に作業時間帯を検討する。
- ・レーザー打音検査装置を搭載した車両の移動経路や設置場所を綿密に計画する。特に不整地では、車両のスタック等が考えられるため、斜め照射を視野に配置計画を検討する。
- ・住宅密集地で使用する際は、事前に近隣住民に対しビラ等で作業内容（安全性）や作業時間帯等を周知する。

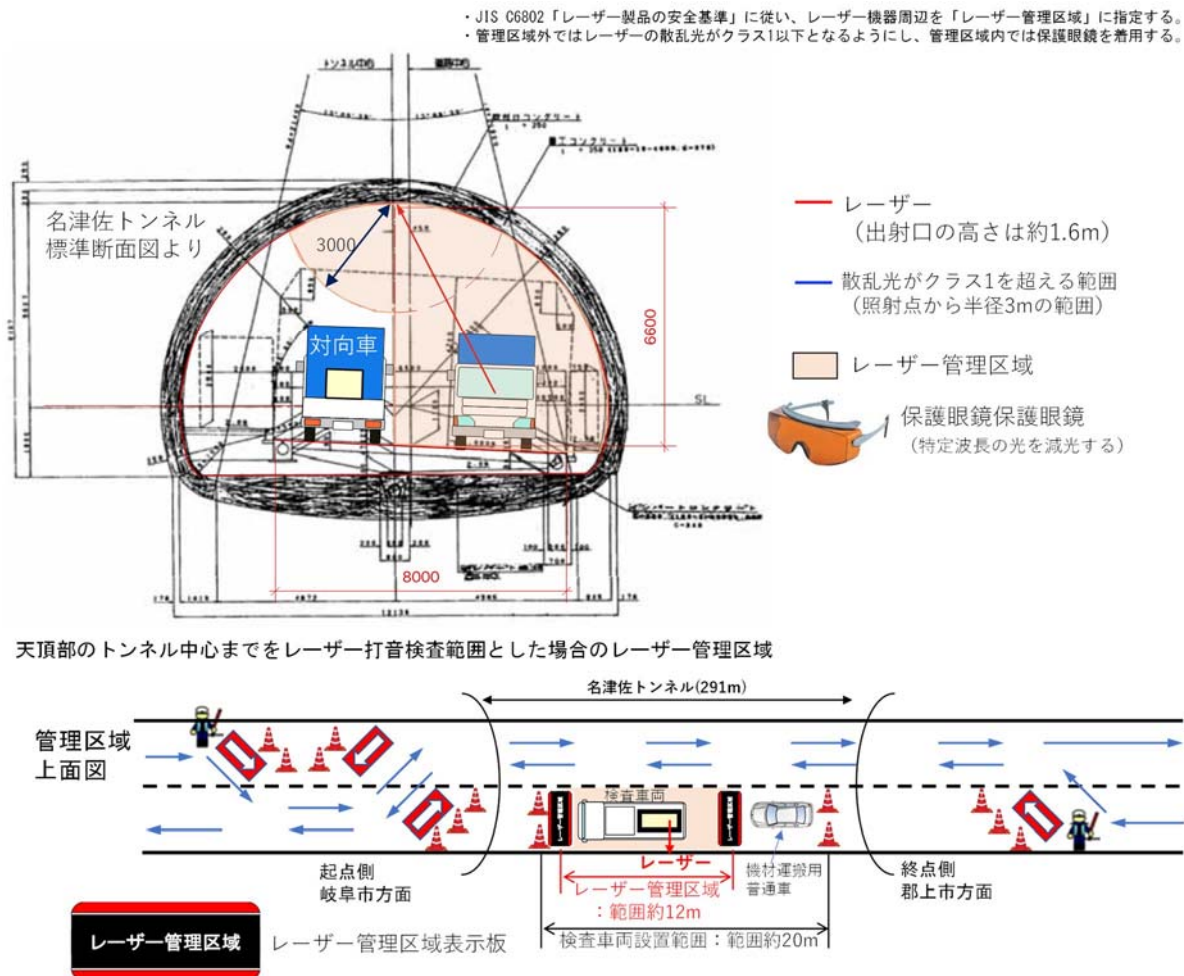


図-5.8.2 レーザー管理区域の事例

## 参考文献

- 1) 平野逸雄, 他: トンネル覆工コンクリート打音診断機の開発, 大成建設技術センター報 Vol. 35 (2002) pp.1-4.
- 2) 東急建設株式会社: トンネル点検・診断システム iTOREL, 点検支援技術性能カタログ (トンネル), pp. 2-4-34 - 2-4-44, 令和5年3月.
- 3) 川上幸一: 赤外線熱計測による地下鉄覆工コンクリートの浮き検出方法の検討とその応用, 早稲田大学大学院 創造理工学研究科博士論文 (2019).
- 4) ウォールナット株式会社: 電磁波探査ドローンによる覆工探査技術, 点検支援技術性能カタログ (トンネル), pp. 2-4-66 - 2-4-76, 令和5年3月.
- 5) 新日本非破壊検査株式会社: ドローン機能を活用した点検ロボット, 点検支援技術性能カタログ (橋梁), pp. 2-3-45 - 2-3-55, 令和5年3月.
- 6) パシフィックコンサルタンツ株式会社: 走行型高速3D トンネル点検システム MIMM-R, 点検支援技術性能カタログ (トンネル), pp. 2-4-45 - 2-4-55, 令和5年3月.
- 7) 西日本旅客鉄道株式会社, 公益財団法人レーザー技術総合研究所等: レーザーリモートセンシングを用いたコンクリート構造物の健全性評価技術(1)コンクリートの欠陥検出, 土木学会第69回年次学術講演会(2014年).
- 8) 保田尚俊, 島田義則, 江本茂夫, 金田道寛, 田中幸司, 武岡学, 石田信孝, 御崎哲一, 岡義晃, 桶谷栄一: 覆工コンクリートのはく落に対する健全度判定の評価指標, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.77, No.1, pp.32-43, 2021.
- 9) 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.
- 10) 鈴木理絵, 多田祐希, 中村光, 三浦泰人: 弾性波法による健全部判定に基づくコンクリートおよび断面修復部内部の欠陥検出, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.1617-1622, 2018.
- 11) 御崎哲一: レーザーを用いたトンネル覆工コンクリートの欠陥検出方法に関する研究, 京都大学社会基盤工学博士論文, 2015.
- 12) ネクスコ東日本エンジニアリング: 検査支援装置, 検査支援方法, 検査支援プログラム, および, 検査支援システム, 出願・申請番号: 特願 2014-216956 (P2014-216956), 登録番号: 特開 2016-85089 (P2016-85089A), 発明者等: 阿部浩樹, 伊藤和宏, 2016.

## 第6章 道路管理者等との意見交換

### 6.1 目的

本研究により開発した技術が、広く活用できるように、道路管理者等と複数回意見交換を実施し、レーザー打音検査装置の測定条件や計測範囲、運用方法、安全管理方法等について、対応案をとりまとめる。

### 6.2 概要

本項目では、第1章から第5章で実施した技術研究開発の内容を踏まえ、レーザー打音検査装置の測定条件や計測範囲の明確化、トンネル覆工目地部のうき・剥離に対する技術検証や適用性評価、無筋コンクリートを対象とした技術検証や適用性評価、現場条件に照らした運用方法や安全管理の方法について整理する。

### 6.3 レーザー打音検査装置の測定条件

#### (1) 橋梁実構造物実験により得られた知見

橋梁自体の振動が混在することが判明し、FFT解析のスペクトルに影響することが懸念された。この橋梁の振動周波数は、0.1秒程度でも変化することを確認した。このため、橋梁構造物においては、FFT解析による「ピーク強度比法」や「周波数面積比法」ではなく、「減衰グラフ評価法」が適する。

#### (2) トンネル実構造物実験により得られた知見

トンネル目地部でのうきの幅50mm程度を計測するためには、レーザー打音検査装置の照射ピッチを50mm程度(対象損傷の大きさ)以下にする必要があることを確認した。

MIMMによる走行画像からレーザー打音検査装置の計測範囲や計測ピッチを判定する方法において、ひび割れ密集に着目した判定方法では、目地部のうき範囲(従来点検でうきと診断された三ヶ月形状範囲等)を抽出することができないため、従来点検でのチョーキング跡などの抽出による補足が必要である。

MIMMによる走行画像からレーザー打音検査装置が計測できない施設範囲は、その立体的な形状を含め抽出可能であるが、そのデータを転送し、レーザー打音検査装置で計測範囲を決める際、車面の傾き(レーザー打音検査装置が載る車両の傾き)を考慮

して位置計算を行わないと、十数cmほど照射位置がずれる。

MIMMによる走行画像にレーザー打音検査装置の計測結果を重ね合わせる場合、レーザー打音検査装置がレーザー照射した車両の位置情報をリアルタイムに計測することで、覆工展開写真への貼り付け精度が向上し、従来点検時の位置の把握精度の向上につながる。

#### (3) レーザー打音検査装置の定常振動

供試体実験の結果、レーザー打音検査装置の計測結果(3波形平均)では、常に1kHz付近に大きなスペクトルが生じる。これは、機械由来と想定され、特に振動が弱い場合(健全部)において、時間波形の歪み(オーバーシュート)が顕著となるため、FFT解析を行う場合は、この1kHzよりも低い周波数をカットする等の周波数フィルターが必要となる、一方で、減衰波形を評価する場合の過判定(損傷度が高い)に繋がる懸念されるため、周波数フィルター無しのデータを(低周波振動の影響を受けないように)短時間切り出し、減衰度合いを評価することが望ましい。

### 6.4 レーザー打音検査装置の計測範囲

#### (1) ピーク強度比法

中間部1本供試体の「ピーク強度比法」による判定は、レベルⅠの適合率71%、レベルⅢの適合率77%と良い適合率を示すが、レベルⅡの区分は難しい。

中間部2本供試体の「ピーク強度比法」による判定は、レベルⅠの適合率79%、レベルⅢの適合率82%と良い適合率を示し、損傷範囲が広がると適合率が向上すると考えられる。しかしながら、中間部1本供試体と同じくレベルⅡの区分は難しい。

隅角部供試体(上面)の「ピーク強度比法」による判定は、レベルⅠの適合率86%、レベルⅢの適合率54%を示す。レベルⅠは良い適合率を示すが、レベルⅢの適合率は低い。隅角部供試体は、はじめにクラックが現れた面を上面としているが、供試体実験結果からは、側面の方にクラックが深く進展する傾向が確認され、隅角部供試体の上面は、側面に比べ損傷度が低いことが要因と想定される。中間部供試体と同じくレベルⅡの区分は難しい。

隅角部供試体(側面)の「ピーク強度比法」による判定は、レベルⅠの適合率82%、レベルⅢの適合



率71%と良い適合率を示すが、レベルⅡの適合率は低い。供試体実験結果からは、側面の方にクラックが深く進展する傾向が確認され、隅角部供試体の上面よりもレベルⅢの適合率が向上したと考えられる。

供試体実験からは、レベルⅠ（健全範囲）の適合率は高いこと、レベルⅢでも損傷度が高いと適合率が高くなり、レベルⅡに近いレベルⅢが多くなると適合率が低下する傾向が確認された。このため、ピーク強度比法は、レベルⅠと損傷度の高いレベルⅢの区分には適すると考えられる。

## (2) 減衰グラフ評価法

減衰グラフ評価法は、人力打音検査の結果、レベルⅠに近いレベルⅡと評価されている範囲において、適合率が下がる（CE0102）。しかしながら、パイプ直上などの損傷が進んでいる範囲のレベルⅡは検出できていることから、損傷が進み減衰振動が顕著になってくると検出精度が上がると想定される。

また、レベルⅢに近いレベルⅡにおいてもレベルⅡの適合率が下がっているが、これはレベルⅢに近い評価が多くなったためであり、安全側の評価となっていることが確認された。

減衰グラフ評価法により、レベルⅠ、レベルⅡ、レベルⅢの区分が可能であることは確認できたが、その閾値の設定については、さらに供試体実験を進め精度を向上していく必要がある。

## (3) 面的な評価

減衰波形評価法の評価結果を面的なコンタ図で示した場合、叩き落とされた範囲で評価値が低い（健全）範囲や、叩き落とせなかった箇所で評価値が高い（損傷）範囲が確認される。局所的に評価値が点として現れる要因として、鋼球落下試験が1cmピッチで計測しており、その点でのコンクリート表面の付着物等の影響を受けていることも考えられる。このため、その計測点と周囲の点で荷重平均化したものを評価値と設定することで、このような局所的な評価値が混在することによる診断への影響を避けることが必要である。なお、中間部供試体に比べ、損傷の範囲がパイプ軸方法に狭く生じる隅角部供試体は、パイプ軸方法の平均化処理が望ましいと考えられる。また、レーザー打音検査装置の計測ピッチは、20mm～50mmとなることから、周囲8点平均の方が良いと考えられる。

隅角部供試体（覆工目地部）は、損傷範囲が狭いため、周辺の平均化を行う場合は、損傷箇所が埋もれる可能性が高いことから、その平均範囲に留意する必要がある。

## (4) ひび割れの深さ

レーザー打音検査装置は、鋼球落下試験の打撃力よりも小さいため、レベルⅡの検出範囲が小さくなっている。また、その検出範囲はコンクリート表面から5cm程度である。ひび割れが浅い範囲は、叩き落

とし範囲とレーザー打音検査装置の計測結果を減衰グラフ評価法でレベルⅢと評価された範囲とは、よく整合する。

レーザー打音検査装置による供試体実験の結果、叩き落とし範囲の中心部で健全と評価している供試体も確認された（CE0201）。この要因としては、叩き落とし範囲の中心部は、ひび割れ深さが深いため、検出が難しいと想定されるが、ひび割れが表面に近くなる叩き落とし周辺部は、損傷度を高く計測できていることから、ひび割れ閉合範囲として想定可能と考えられる。一方で、同じ範囲は、鋼球落下試験でも健全と評価されていることから、もともとひび割れが存在せず、石刀ハンマーによりクラックがつながったとも考えられる。このため、同一条件で製作された供試体について、石刀ハンマーで叩く前の供試体実験の切断結果とレーザー打音検査装置の計測結果の考察が重要である。

レーザー打音検査装置の計測結果を減衰波形評価でコンタ図化し、評価の高い範囲（損傷度の高い範囲）の谷間を確認することでひび割れが閉合する範囲を想定することができると考えられる。

## 6.5 従来非破壊検査では検出困難な目地部のうき・剥離に対する技術検証や適用性評価

### (1) トンネル覆工目地部の損傷原因

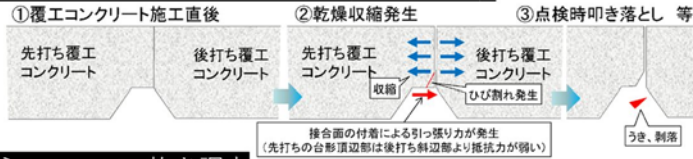
トンネル変状の大半は覆工目地部のうき・剥離となり、覆工目地部の診断と、その叩き落としに点検時間の多くを要している。覆工目地部のうき・剥離は、覆工打設時のセントルの押し付け圧などにより生じる打ち継ぎ目隅角部に発生する比較的浅い深度での半円状の貫通ひび割れ、コンクリート打設時の充填不足等による骨材分離、また型枠下端からのコンクリートペーストの漏れにより空隙が生じ脆くなっている状態などが要因と考えられている<sup>1)</sup>。図-6.5.1は、本研究とは異なるが、実際のトンネルにおいて、目地部のうき範囲でコア抜きした調査結果である。これによれば、不均一なジャッキダウンによる型枠の振れによる負荷、覆工コンクリート打設後の乾燥収縮による引張負荷により発生した斜め方向のひび割れが確認された。レーザー打音検査装置は、このような損傷を検知することを目的とする。

### (2) 覆工目地を模擬した供試体

覆工目地は隅角部供試体で再現した。第5章の隅角部供試体の切断面の観察によれば、図-6.5.2に示す様にひび割れ深さ50mm程度（最大60mm程度）のひび割れが再現できている。

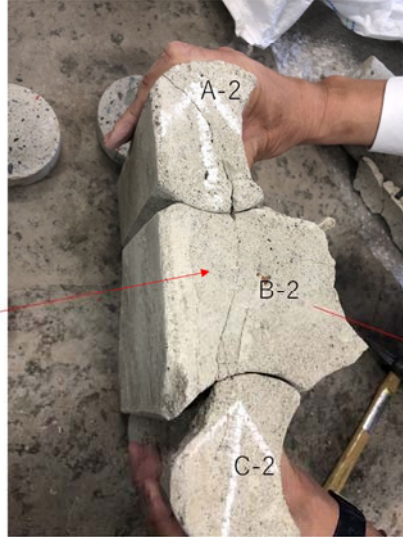
これにより、隅角部供試体で目地部を再現し、レーザー打音検査装置の適用性を検証するものとした。

**トンネル覆工目地部のクラック発生メカニズム<sup>1)</sup>**



**実トンネルでのコア抜き調査**

道路トンネルの目地部の「うき」範囲について、コア抜き調査を実施した。その結果、コンクリートの収縮により接合面が引っ張られたことを要因とする斜め方向のクラックを確認した。



覆工表面から目地側に向かって斜め方向にクラックが入っている。この斜め方向のひび割れを再現する。

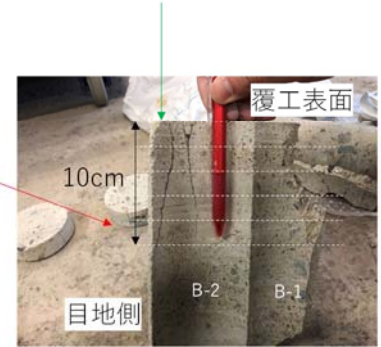


図-6.5.1 目地部の「うき」「剥落」発生メカニズムの考察

**覆工目地部のうき・剥離の再現**

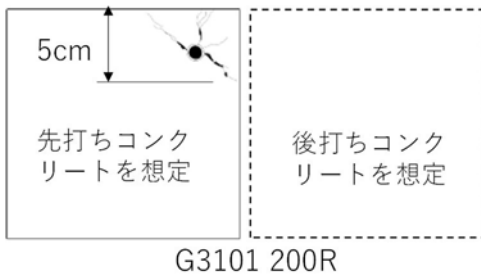


図-6.5.2 隅角部供試体による覆工コンクリート目地部の再現

**(3) 名津佐トンネルでの実証実験での検証**

本研究開発で開発したレーザー打音検査装置の計測結果から減衰グラフ評価法を用いて損傷度を覆工コンクリート壁面にコンタ評価したものを図-6.5.3に示す。これによれば、従来点検によりうき「U」と判定された範囲は、減衰グラフ評価法により再現できていると考えられる。

**6.6 無筋コンクリートを対象とした技術検証や適用性評価**

**(1) 対象とした変状**

覆工コンクリートを含み、無筋コンクリートで生じる施工を要因とした変状は、異物混入やジャンカ等が考えられる。

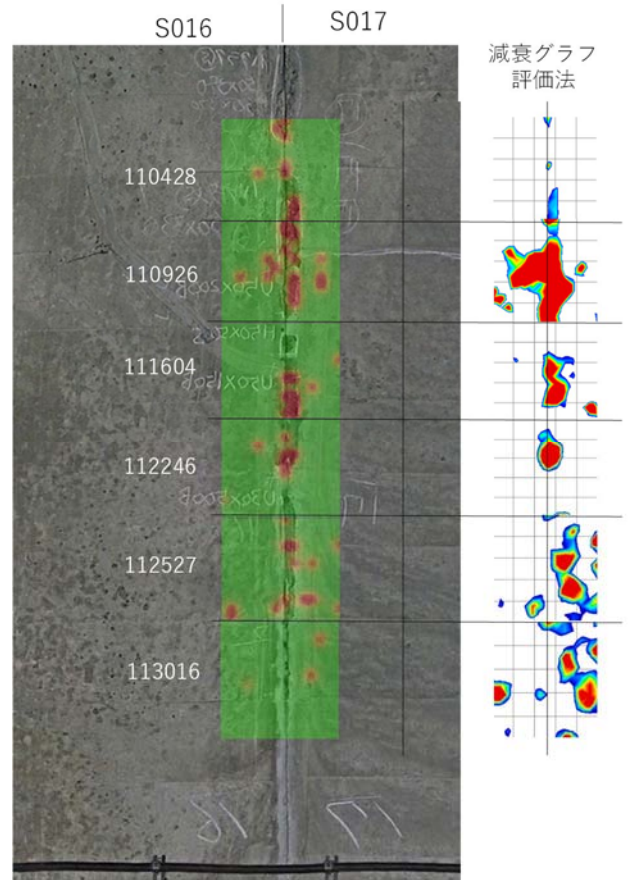


図-6.5.3 名津佐トンネルでの実証実験結果 (S016～S017)

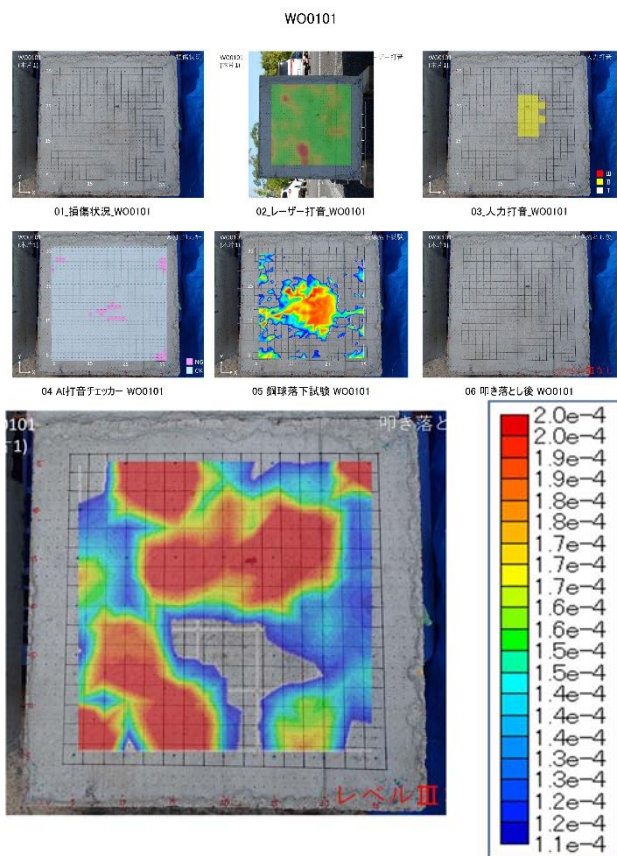


図-6.6.1 木片を混入した供試体実験結果

このため、本研究開発においては、異物として木片や発泡スチロール、施工不良としてジャンカを人為的に生じさせた供試体を作成し、レーザー打音検査装置による適用性を評価した。

## (2) 供試体での適用性評価

本項では、木片が混入した供試体に対するレーザー打音検査装置の計測結果を図-6.6.1に示す。レーザー打音検査装置の結果は、平均化の影響により検出範囲が大きく出ているが、木片等の異物混入を検知できていることが確認できた。なお、木片以外の異物混入の供試体実験結果は、資料編に示す。

## 6.7 現場条件に照らした運用方法や安全管理の方法

### (1) トンネルにおける運用方法や安全管理方法

トンネル天端部の中心位置の打音について、従来の人力打音検査では、供用中の反対車線に剥離片が落ちないように待ち受けをしながら、打音検査を実施している。レーザー打音検査装置で計測する場合、待ち受けができないため、供用中の反対車線にも剥離片が落下する可能性がある。このため、天端の目地部を計測する場合は、反対車線への配慮が必要となる。



図-6.7.1 レーザー打音検査装置のトンネル天頂部への照射状況

トンネルの幅員に余裕があれば、中心線から反対車線側に規制範囲を増加して対応するが、幅員によっては難しいトンネルもある。このため、適用条件として整理していく必要がある。この課題に対し、名津佐トンネル実証実験においては、天頂部へのレーザー打音検査装置の計測は、図-6.7.1に示すように交通規制を上下線で切り替えるタイミングで、現道交通が無い状況で実施する運用を行った。(レーザー打音検査装置の位置に交通規制員を配置して、切り替えるタイミングの情報共有を受けながら、レーザー打音検査装置を照射) この運用により全止めしなくてもレーザー打音検査装置の計測が可能であると考えられる。

### (2) 橋梁における運用方法や安全管理方法

トンネル点検同様、桁下道路を規制して点検する際は、同様の対策が必要である。それ以外で考えられる点検環境としては、公園、河川敷、駐車場など、第三者が利用する場所からの照射が考えられる。

基本的には、通常の点検同様、第三者の立入を禁止する措置を施す必要があるが、その範囲を「レーザー管理区域」まで広げていく必要がある。ただし、10m先をレーザー照射する際は、桁下利用者への反射波の影響はないため、そこまでの対策は不要である。一方で、橋梁の場合は、住宅密集地に架設された橋梁での点検も考えられるため、レーザー照射の際の「音」に対する配慮が必要である。そのため、事前に近隣住民に対し、ビラ等で作業内容(安全性)や作業時間帯等を周知しておく必要がある。

## 参考文献

- 1) 中国地方整備局：トンネル覆工コンクリートの長期保証について