

## M3 : maintenance/management/machinery

特集 道路における維持管理機械

# レーザを用いたトンネル覆工コンクリート測定車 —測定車による点検の効率化—

伊藤 哲男・馬場 弘二

現在のトンネル覆工のひび割れ調査は、暗い坑内環境下で近接目視を主体として実施されており、調査時間が長期にわたることから、人的誤差の増加や規制時間の増大を引き起こしている。日本道路公団においては、現在一部試行されているアルゴンレーザによるひび割れ調査技術を、トンネル覆工の点検技術に活用すべく、計測走行速度の高速化によって車線規制を不要とした手法の確立を目的としてレーザクラック計測車の改良を実施した。これにより、連続印刷画像と呼ばれる覆工コンクリートの展開写真を用いて、机上で技術者が画像から得られる付加情報を基にひび割れ展開図の作成が可能となり、ひび割れなどの覆工表面状態を把握するための点検手法としての使用が可能となった。

キーワード：トンネル、点検、レーザ、ひび割れ、効率化、高速化

## 1. はじめに

社会資本整備で建設された構造物のメンテナンス時代到来といった背景で、トンネルの供用延長の増加とともにトンネル覆工コンクリートのはく落等の事象を受け、覆工の不具合を早期に検出し、構造劣化や機能低下に対して維持補修の優先順位を明確にすることが不可欠となってきている。

一方で、トンネル覆工コンクリートのひび割れはトンネルの健全度を評価するひとつの指標として用いられているが、現在のひび割れ調査は暗い坑内環境下で上向きの近接目視を主体として実施され、調査時間が長期にわたっている。そのため、苦渋作業となるばかりでなく人的誤差の増加や規制時間の増大を引き起こしており、精度の高い効率的な調査技術が望まれている。

現在、日本道路公団（以下、JH という）においては、アルゴンレーザによる調査法<sup>1)</sup>が構築され、活用が図られているが、現行システムでは計測にあたって計測速度が遅いため車線規制が必要であり、効率的、経済的な調査システムへの改良

が望まれている。

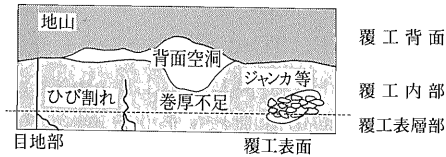
したがって、レーザクラック計測車の高速化を図ったうえで、当該システムを導入したトンネル覆工コンクリートの新たな点検手法を確立していく必要がある。その場合、主に計測ピッチを飛ばして高速化することとなるため、得られるひび割れの精度が点検における有効な判断指標に成り得るかが問題点となる。

ここでは、システム改良の結果とレーザクラック計測車を用いたトンネル覆工点検手法およびその運用計画について述べる。

## 2. 覆工の不具合と点検・調査対象

トンネル覆工コンクリートの不具合を効率よく探し出す非破壊検査技術は、開発や改良が急速に進められているにもかかわらず、現状では全ての欠陥を探し出せる機能を網羅した万能機種は存在しない<sup>2)</sup>ため、各々の目的に合った機種を組合せて使用する必要がある。図-1に非破壊検査技術の適用に関する概念を示す。

トンネル覆工コンクリートにおけるレーザクラック計測手法の点検・調査の対象は、ひび割れなど

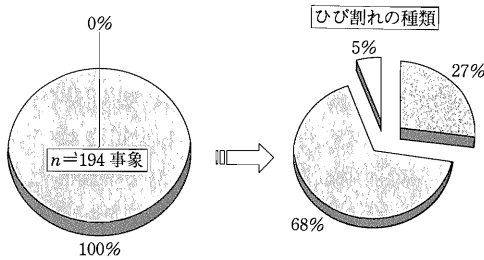


覆工コンクリート表面 ⇒ レーザクラック計測手法  
 覆工コンクリート表層部 ⇒ 赤外線  
 覆工コンクリート内部・背面 ⇒ 打音・電磁波探査・超音波 etc } 非破壊検査機器

図一 非破壊検査技術の適用に関する概念

の覆工表面状態の把握であり、内部欠陥に関しては別途詳細な調査が必要となる。

しかしながら、ひび割れの発生はコンクリートの収縮時の地山の凹凸やインバートによる脚部などの拘束条件によるだけでなく、外力に起因する場合にも発生することから、様々な変状の診断に際しての初期情報となるものである。また、コンクリート片のはく離、はく落による走行車輛への危険性が問題となるが、図一2に示す調査結果を見ても、ひび割れの発生していない箇所における事象の発生はほとんど無いものと考えられる。



<ul style="list-style-type: none"> <li>■ ひび割れに関係した浮き・はく離・はく落がある</li> <li>□ ひび割れは無いがはく離・はく落はある</li> <li>□ ひび割れは無いが浮き(溜音)がある</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ 閉合ひび割れ</li> <li>■ 一方向ひび割れ</li> <li>□ 交差ひび割れ</li> </ul>
---	---

図一2 ひび割れと浮き、はく離、はく落の関係

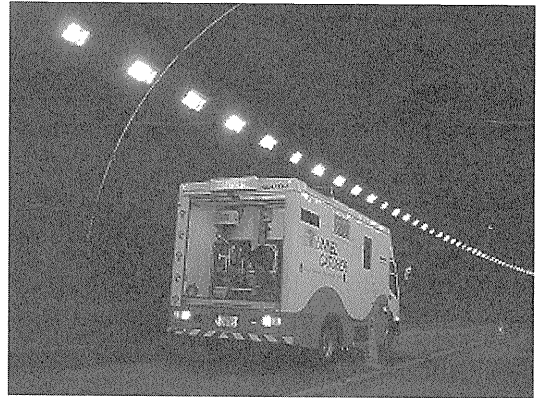
したがって、ひび割れ発生・進展状況を効率良く定期的に把握、蓄積することは、非常に重要なことである。

なお、図一2はJHの管理するトンネルで、近接目視点検において得られた結果より、浮き、はく離、はく落の発生があった箇所のひび割れとの関係をとまとめたものである。

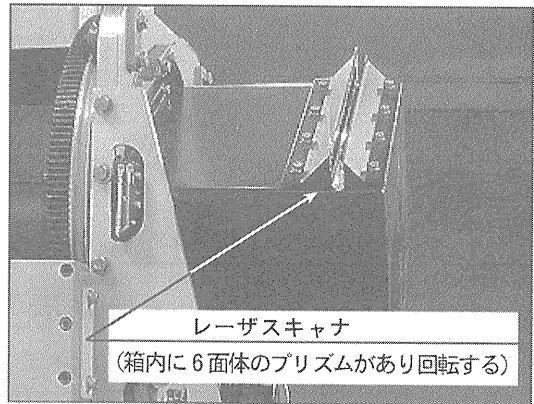
### 3. レーザクラック計測の原理

レーザスキャナでレーザ光線をトンネル壁面に

照射し、壁面で反射した光線の微妙な輝度の強弱を光センサにより読み取り、256階調にデジタル化し高密度磁気テープに記録する。このレーザ光線の反射光量データを、車両の進行方向に連続して読み取ることにより鮮明な画像を得るものである(写真一～写真三)。



写真一 レーザクラック計測状況



レーザスキャナ  
 (箱内に6面体のプリズムがあり回転する)

写真二 レーザスキャナ



※センサーは左右2台ずつ、屋根に2台の計6台を搭載。計測時は片側と屋根の4台使用。

写真三 光センサ

具体的にはデジタルカメラによる撮影画像と原理は同じであり、「画像」として読み取るようになるため凹凸などの奥行きは判らないが、ひび割れの有無による陰影の差によって、連続で立体感のある画像を極めて短時間に撮影できる特殊な技術である。

#### 4. 高速化に伴う改良コンセプト

現在調査に使用している車両は計測ピッチ 0.5 mm (横断方向)×2 mm (縦断方向)で計測速度 4 km/h と遅く、また、計測開始前の機器調整に時間を要し、一車線を固定して閉め切った車線規制が必要となっている。

今回、「計測走行速度の高速化と初期調整作業の自動化による車線規制の撤廃」を目的として、レーザクラック計測車の改良を実施した。改良内容を表-1 に示す。最大のポイントとなる計測走行速度は、高速道路上において車線規制を必要としない 50 km/h 以上を目標とした。

#### 5. 新旧仕様の性能比較試験

試験は、在来工法により施工された 2 車線トン

表-1 レーザ計測車仕様比較

項目	現行 (TC-1)	新仕様 (TC-2)
ベース車両	8 tトラック車両	現行車 (8 t車) と同等又は以下
計測速度 <sup>※1</sup>	4 km/h	50 km/h
レーザスキャナ 最高回転速度	15,000 回転/分	21,000 回転/分
	四面体	六面体
	玉軸受タイプ(ベアリング)	
レーザ走査角度	約 150 度	約 120 度
計測ピッチ (横断×縦断)	0.5 mm×2 mm	1 mm×8 mm
データ記録速度	16 MB/s	30 MB/s
計測方式	2パス	2パス
コメント	・車線規制必要	・レーザスキャナが市販品で構成できる ・レーザ走査角度は実用性を考慮すれば 120°以下には出来ない ・車線規制不要
備考	・計測範囲としては、内装板より上側、内装板無しの場合はスプリングライン部より上側。 ・計測ピッチは、記載計測速度 (Max) の場合。 ・計測方式は、2車線トンネルの場合。	

※1: 計測速度に及ぼす要因

- ①レーザ走査角度
- ②計測ピッチ
- ③データ記録速度
- ④レーザスキャナ最高回転速度

ネルを使用し、新旧のレーザクラック計測車 (以下「TC-1 (旧), TC-2 (新)」という) を用いて、50 km/h 走行時の計測ピッチ 1.0 mm×8 mm と、4 km/h 走行時の計測ピッチ 0.5 mm×2 mm の各々の結果をひび割れ展開図から得られるひび割れ密度で比較した。

同様に、近接目視詳細調査及び路上目視点検によるひび割れ展開図から得られるひび割れ密度とも比較を行った。計測走行速度は、0.5 mm×2 mm の計測で TC-1=4 km/h, TC-2=10 km/h, 1.0 mm×8 mm の計測で TC-1=25 km/h, TC-2=50 km/h である。なお、近接目視詳細調査とは、通常実施される近接目視点検よりもさらに時間をかけて (1 スパンを 4 人で 2~3 時間) ひび割れ位置や幅を詳細に調査したもので、このデータを実態の正值としてひび割れ密度で評価することとした。

#### 6. 試験結果 (性能評価)

試験トンネルの同一スパンにおけるひび割れ展開図の比較を図-3 に、性能比較試験結果を図-4 に示す。

近接目視詳細調査のひび割れ展開図では、0.1 mm 以下のひび割れ幅までも記録されている。また、記入用紙に細かい罫線割を準備した上で調査に望んだこともあって、ひび割れパターンや長さおよび位置が正確に記録されており、このデータを実態の正值としたことに問題は無いものと考えられる。

計測ピッチ 1.0 mm×8 mm は 0.5 mm×2 mm に比べ、新旧のレーザクラック計測車ともに計測精度が 30% 程度落ちているが、これは主に縦断方向の計測ピッチが 2 mm から 8 mm へと広がっていることに起因していると考えられる。しかしながら、新旧のレーザクラック計測車で比較すると、TC-2 の計測精度が 10% 程度向上している。

また、レーザクラック計測車で収録したデータを画像データに変換処理して作成した、写真-4 に示すような「連続印刷画像」と呼ばれる覆工コンクリートの展開写真を用いて、技術者が机上でひび割れ展開図 (図-5 参照) を作成したものと、TC-2 のひび割れ解析展開図を比較すると、計測

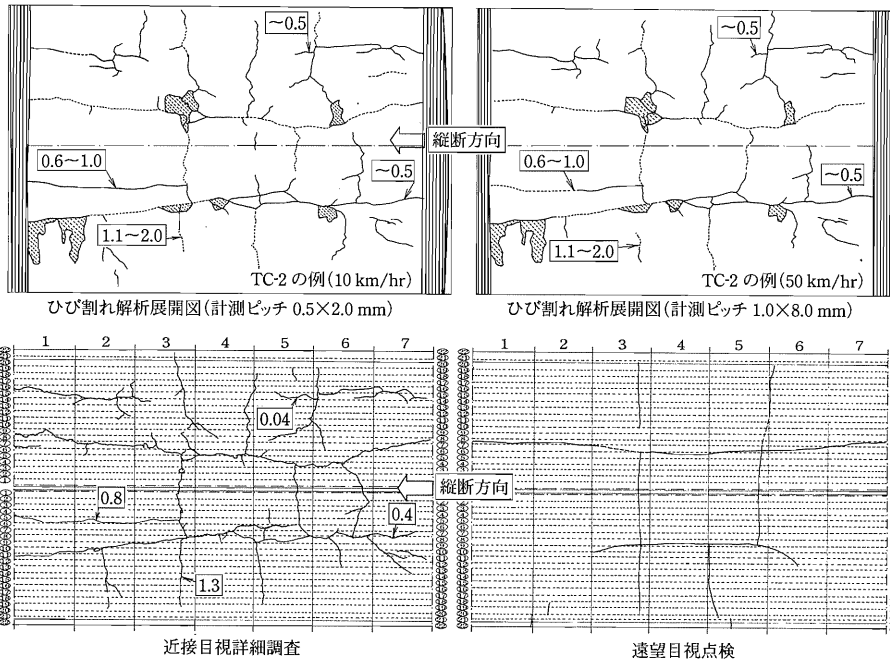


図-3 ひび割れ展開図の比較

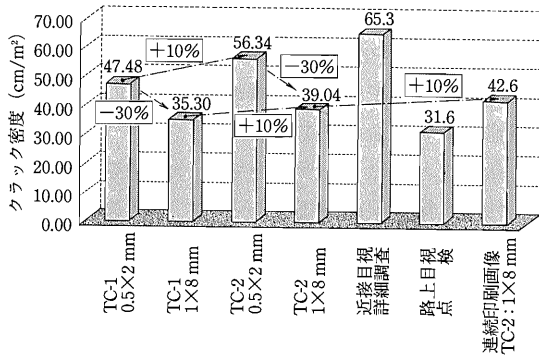


図-4 性能比較試験結果

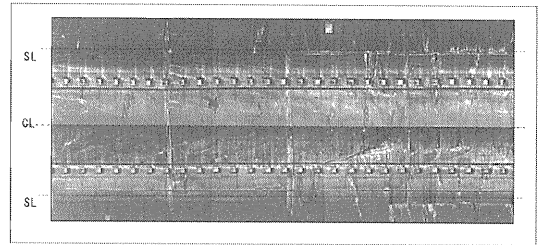


写真-4 連続画像印刷

ピッチ 1.0 mm×8 mm (50 km/h) の場合 10% 程度精度は向上している。また、現行の TC-1 の 4 km/h 走行時の計測ピッチ 0.5 mm×2 mm (詳細調査として使用) と比較しても 90% 程度は確保出来ている。したがって、連続印刷画像を採用した場合、湧水、遊離石灰等のひび割れ以外の付加情報が得られることで技術者の経験を活かしたひび割れ展開図の作成がなされているものと考えられる。なお、使用した連続印刷画像は TC-2 の計測ピッチ 1.0 mm×8 mm のものである。

以上より、レーザクラック計測は、連続印刷画像によるひび割れ展開図の作成手法を用いることで、ひび割れなどの覆工表面状態を把握するための点検手法として、使用が可能な精度となり、また、有効な判断指標にも成り得ることがわかった。

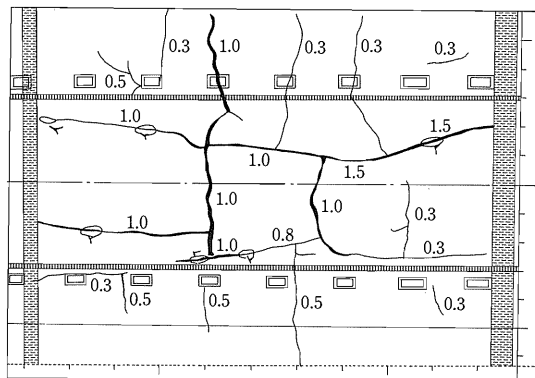
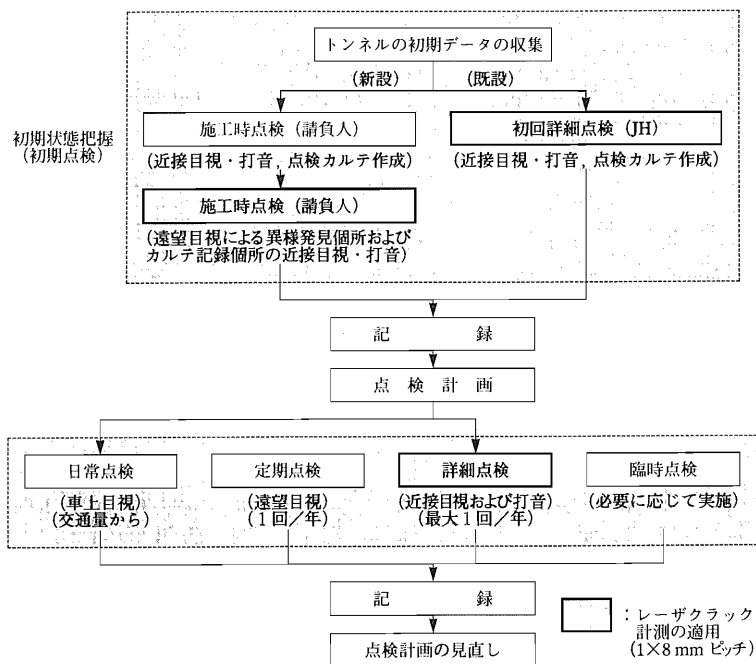


図-5 連続印刷画像からのひび割れ展開図



図—6 現状での覆工コンクリートにおけるレーザクラック計測の運用フロー(案)

なお、経験年数の少ない技術者の判読能力のレベルアップにより、更なる平均的な判定能力の向上を目指していく必要がある。

## 7. レーザクラック計測を用いた新たな点検手法の提案

老朽化あるいは変状したトンネルの補修を計画するうえで、トンネル覆工コンクリートに発生したひび割れ状況を調査・把握することは不可欠であるが、車上目視や遠望目視により実施される日常点検及び定期点検においては、トンネル覆工コンクリートという特殊性から、大きな変状が発生するか路上へのはく落等の事象が発生しなければ、容易には損傷状況を把握することは難しい。また、近接目視や打音により実施される初期点検や詳細点検においても、トンネルという暗く汚れた環境下での苦渋作業であること、調査員の熟練度により個人差が生じること等の問題点は残っている。

そこで、JHにおける点検体系の中での、高速化されたレーザクラック計測車を用いた点検手法及び位置付けを検討した。

現状でのトンネル覆工コンクリートにおけるレーザクラック計測の運用フロー(案)を図—6に、

詳細点検への適用フロー(案)を図—7に示す。レーザクラック計測の運用には、大きく分けてトンネルの初期状態の把握(新設トンネル及び既設トンネル)と、通常実施されるトンネル点検のうち詳細点検(最大1回/5年)への適用が考えられる。

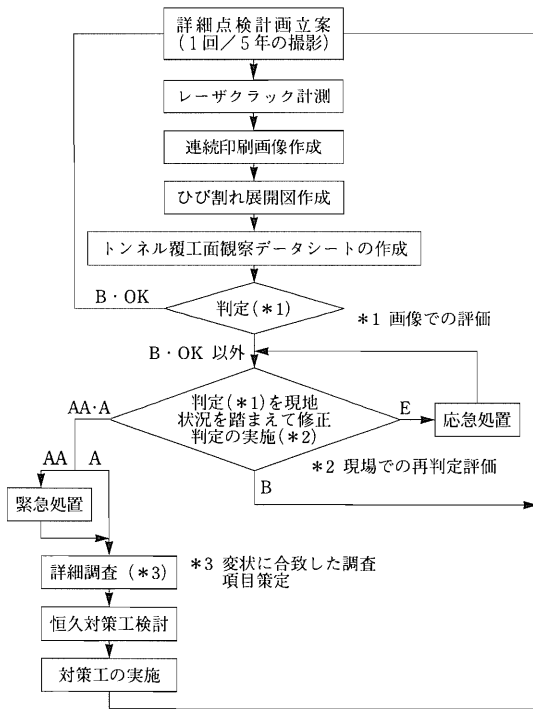
その手順として、まず、前述した高速化の比較試験結果より判断し、車線規制を必要としない50 km/h以上の走行により得られる、連続印刷画像(写真—4参照)と呼ばれるトンネル覆工コンクリートの展開写真を基にひび割れ展開図を作成する。そしてこれを、近

接目視点検の代替と位置付けることで、応急対策の必要の有無や詳細調査箇所の抽出を机上で行い、現場での作業を減らし効率的かつ経済的に点検を実施していくものである。

高速化されたレーザクラック計測車を用いて得られた点検結果の評価手法としては、連続印刷画像を基に作成されたひび割れ展開図より、ひび割れ密度、ひび割れ形態、その他覆工表面情報を加味して定量的に評価点を算出することで、点検結果をランク判定し、対処方針を決定していく手法を作成する予定である。なお、レーザクラック計測手法は、その特性からひび割れの深さ方向(段差、圧ざなど)の状態や打音による内部状態の把握が出来ないことから、点検結果の判定により抽出されたスパンについて、現地において近接目視および打音点検を実施し再評価を行うこととなる。

また、机上評価に際して剥離・剥落などによる通行車輛への危険性が確認された場合には、緊急補修を実施する必要があることから、構造劣化や機能面に関する評価点とは別に観察項目を設定し、現地判断を取入れていくものとする。

ここで、トンネル覆工コンクリートにおけるレーザクラック計測により得られる連続印刷画像を用



図一七 詳細点検への適用フロー（案）

いた点検のメリットとしては、

- ① 机上で詳細調査箇所の抽出・数量の把握ができ、損傷状況の多少によって効率的な詳細調査計画の立案が可能、
- ② ①の結果、車線規制回数を減少出来る、
- ③ ①および②により経済性が向上する、
- ④ 1.0 mm、0.5 mm などの太さの凡例を連続印刷画像上に設けることによって、0.5 mm 程度の幅であっても写真上でひび割れを追跡することが出来るため、継続的にデータを残すことでひび割れの進行度合の把握が可能、
- ⑤ 画像から得られる漏水、遊離石灰、補修状況などの各種情報により経年変化や具体的な位置の把握など多岐にわたる利用が可能、

等が挙げられる。

また、課題としては、

- ① 更なる精度向上を目指したレーザ計測車仕

- 様の改良による計測ピッチの細分化、
- ② 連続印刷画像からのひび割れ展開図作成にあたり、経験年数の少ない技術者の判読能力の向上と均質化、
- ③ 計測から机上判定までに要する時間のうち、連続印刷画像出力のシステム整備による短縮、が挙げられる。

## 8. まとめ

トンネルの保安全管理については、昨今の情勢からさらなる点検の合理化が求められている。特に高速道路においては、供用トンネルの本数の増加とともに様々な制約条件下での点検作業を強いられていることから、今回の高速化されたレーザクラック計測車を用いたトンネル覆工コンクリートの点検技術の確立は有意義なものであると考えられ、JH として早期の運用開始に向けて取り組んでいく。

J C M A

### 《参考文献》

- 1) 日本道路公団：トンネル覆工コンクリートのためのレーザクラック調査法マニュアル，試験研究所技術資料第355号，1997. 9
- 2) 城間，ほか：覆工コンクリートを模擬した供試体による非破壊検査手法の比較試験について，日本道路協会第24回日本道路会議（B），pp. 184-185，2001. 10

### 【筆者紹介】



伊藤 哲男（いとう てつお）  
日本道路公団  
試験研究所  
道路研究部  
トンネル研究室  
主任



馬場 弘二（ばば こうじ）  
日本道路公団  
試験研究所  
道路研究部  
トンネル研究室