

# コンクリート構造物の表面変状調査システムの開発

## Development of a System to Investigate the Deterioration of Concrete Surface

高橋 秀樹*	松井 健一**
Hideki Takahashi	Kenichi Matsui
湊 康弘*	新谷 壽教***
Yasuhiro Minato	Toshinori Shinya
潮田 和司****	椎名 貴快*
Katsushi Ushioda	Takayoshi Shiina

### 要 約

新幹線トンネルなどで発生したコンクリート塊剥落事故以降、コンクリート構造物の維持管理における点検・調査業務の重要性が再認識された。しかし従来は、目視調査や打音検査が主体であったため、多くの労力と時間を要し、さらに調査精度も十分なものではなかった。このような背景から、筆者らは、主にトンネルを対象に、点検・調査精度の向上と作業の効率化を目的とした、表面変状調査システムを開発した。本システムは、対象構造物の調査（撮影・測距）からデータ処理、成果品（表面変状展開図）の作成までを統合したシステムである。調査装置は、デジタルカメラと光波自動視準測距計を搭載し、ひび割れの検出性能は0.2mm幅以上、画像の位置座標データを活用した変状箇所の経年追跡も可能であり、国土交通省の通達に対応している。また、撮影画像の補正や合成作業をソフト的に自動化し、画像処理業務の迅速化と省力化を実現した。

### 目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 調査システムの開発
- § 3. 性能確認試験
- § 4. おわりに

### § 1. はじめに

1999年に発生した新幹線トンネルや高架橋からのコンクリート塊剥落事故以降、コンクリート構造物の品質および維持管理における点検・調査業務の重要性が再認識された。各管轄機関では、施工中の厳しい品質管理、また竣工時およびその後の供用期間中における維持管理を目的とした厳しい検査が実施されている。

特に、竣工時検査の一つとして、構造物表面の変状箇所を調査し、写真や展開図（ひび割れ発生状況や補修履歴等を記載）の形式で提出を義務付けるケースが増えている。管理者らは、この結果を記録・保存し、その後の

経年変化（劣化）の追跡管理に利用することを検討している。また、既設構造物への定期的な調査を実施し、劣化度合いに応じて、補修・補強工事が実施されている。

しかし従来、これらの調査は目視調査や打音検査を主体としてきたため、作業の迅速化、省力化、さらに費用低減を実現することが課題となっている。

このような背景から、筆者らは、コンクリート構造物を人力調査に替わって効率的に点検・調査し、その結果をもとに健全度を客観的に評価・診断した後、構造物の劣化レベルに応じてライフサイクルコスト（以下、LCC）を考慮した補修・補強計画を立案する健全度評価システムの研究開発を実施している。

本文は現在、西松建設・戸田建設共同研究開発中の健全度評価システムのうち、点検・調査を構成する表面変状調査システムの概要と竣工前のトンネル現場で実施した性能確認試験結果について述べる。

### § 2. 調査システムの開発

#### 2-1 開発目標

コンクリート塊剥落事故以後、各管轄機関は所有するコンクリート構造物の維持管理方法の仕様策定に向けた検討を進めている。この内、国土交通省は各地方整備局

\* 技術研究所技術研究部土木技術研究課

\*\* 技術研究所技術研究部

\*\*\* 技術研究所技術研究部環境技術研究課

\*\*\*\* 中部（支）小牧（出）

に対して平成13年3月末に、土木コンクリート構造物の品質確保に関する通達を出した。この中で、ひび割れ発生状況調査の実施に関して、次のような仕様とすることが示された（以下はその一部である）。

- 竣工時における変状展開図および写真の提出
- 0.2mm幅以上のひび割れの記録
- 調査結果の長期保管および維持管理への利用
- 経年劣化の追跡調査の実施

調査結果は、工事完成後における維持管理の基礎資料となり、その調査精度は以後の定期調査の際における健全度の評価結果にも影響する。そのため、調査システムの開発にあたっては、国土交通省の要求仕様を満足する以下のような開発目標を設定した。

- 撮影画像から0.2mm幅以上のひび割れおよび剥離、漏水箇所など表面変状を確認・抽出できる。
- 撮影後に実施する画像処理から表面変状展開図の作成に至る各要素作業を各々自動化し、作業の効率化を図る。
- 画像の位置座標データからひび割れ等の変状箇所の位置を特定することを可能にし、経年劣化の追跡調査の精度を向上させる。
- 調査が他社開発技術よりも安価に実施できる。

2-2 対象構造物と調査項目

本システムで対象とする構造物を表-1に示す。主としてトンネル（NATMトンネル、シールドトンネル）を基本とし、非常避難坑のような小口径断面から、高速道路（三車線）トンネルのような大口径断面まで幅広く対応できる。応用として、高架橋（柱、梁、スラブ下等）や擁壁などの壁状構造物への適用も検討している。主な変状調査項目は表-2のとおりである。

表-1 調査の対象構造物例

適用構造物	対応形状
トンネル（道路、鉄道、水路、共同溝等）	内径3.5~15m程度 <sup>注)</sup>
高架橋（道路、鉄道等）	梁下10m程度
その他（直立壁状構造物等）	（撮影距離で異なる）

注) 二車線/三車線道路とJR単線に標準対応。但し、BOX型については検討中。  
 覆工条件は比較的平滑なコンクリート面とし、セグメント覆工（鋼製、コンクリート製）については対応を検討中。

表-2 主な変状調査項目

調査項目	摘要
ひび割れ	0.2mm幅以上のひび割れ箇所の検出
漏水・湧水	漏水・湧水、色むら箇所の記録
剥離・剥落	剥離・剥落部の面積測定、記録
断面測定	トンネル内空断面測定
補修箇所	ひび割れ注入、断面修復箇所の記録

2-3 調査システムの概要

(1) 調査装置

本装置の概要を写真-1に、また装置に搭載された調査機器およびその仕様を表-3に示す。なお、写真内の丸付き数字は表中の調査機器の番号に対応している。

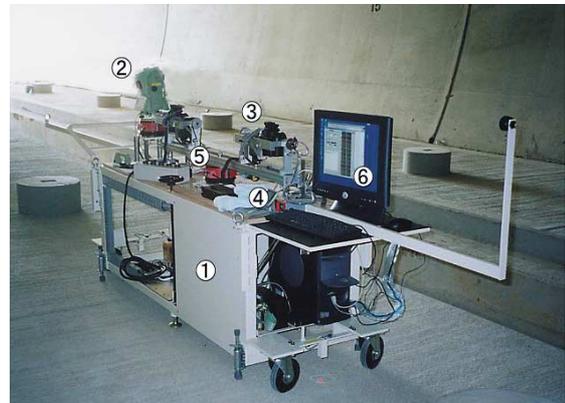


写真-1 調査装置

表-3 調査装置の仕様

①調査台車	
台車寸法	W2,200（プリズム装着時4,400）×H760×D730
重量	調査機器未搭載時 60kg 調査機器搭載時 140kg
付帯装置	台車位置視準用プリズム（台車前後各々1個）
②光波自動視準測距計（1台）	
測距精度	2mm+2ppm
付帯機能	自動追尾・自動視準・レーザー距離機能
③デジタルカメラ（2台）	
単焦点レンズ	35/50/85/135mm（標準レンズ85mm）
仕様	解像度 3040×2016pixel（613万画素） 撮影感度 ISO320/400/800/1600相当 シャッター速度 30~1/2000秒
④レーザー距離計（2台）	
測定精度	40m±3mm
⑤自動精密整準台（2台：光波自動測距計・CCDカメラ用）	
整準範囲	約±4°（Arc Deg.）
⑥制御・保存用パソコン（1台）	
仕様	CPU Intel PentiumⅣ 1.70GHz以上 HDD 80GB以上、搭載メモリ1GB以上推奨 OS Microsoft Windows2000 日本語版 解像度 1024×768pixel以上

本装置は、2台のデジタルカメラでコンクリート表面を連続的に撮影し、ひび割れなどの表面変状箇所およびその状況を把握するものである。また、光波自動視準測距計を使用して取得した画像座標データを解析し、変状箇所の正確な位置座標を求めることができる。さらに、トンネルの場合、内空断面測定も併行して実施でき、標準断面に対する施工精度確認も可能である。

① 調査台車

人力での移動及び調査を可能にすることを目的に、台車下部にキャスターを取付け、小型化と軽量化を図った。

② 光波自動視準測距計

トンネル内に設けた2つの既知の基準点(座標 X, Y, Z)を自動計測することで光波自動視準測距計自身の位置座標を認識する。次に、調査台車の前後に設けたプリズムを自動計測することで調査台車の位置座標を認識する(図-1参照)。また、デジタルカメラによる画像撮影中は、画像中央部までの距離と角度を計測することで画像の座標を取得することができる。この時、トンネルの場合は、内空断面の変位測定も同時に行う。

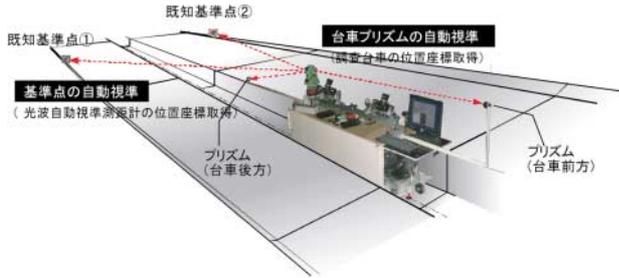


図-1 既知基準点およびプリズム(台車前後)の視準

③ デジタルカメラ

2台のデジタルカメラ(標準設置間隔=1m)は、制御ソフトの指令によって任意の回転角度で回転し連続的に撮影可能とした。1回の撮影で1m×2台=2m幅の画像が取得可能である。

デジタルカメラに装着する単焦点レンズは、対象トンネル(構造物)毎に撮影画角や撮影可能距離等が異なるため、レンズ仕様に依りて選定する必要がある。さらに、オートフォーカス撮影で0.2mm幅のひび割れ検出に必要な仕様で対応する。単焦点レンズの仕様を表-4に示す。

表-4 単焦点レンズの仕様

単焦点 レンズ	撮影条件(トンネル断面180°撮影時)			
	撮影画角	回転角度	撮影枚数	適用距離
ワイド系 35mm	約25°	18°	11枚	0.5~2.5m
標準系 50mm	約18°	15°	13枚	1.0~3.5m
望遠系 85mm	約11°	9°	21枚	2.5~5.5m
望遠系 135mm	約7°	6°	31枚	4.5~10m

例えば、天端アーチクラウン部までの距離が7m程度のトンネルで撮影をした場合、35mmレンズと135mmレンズの画像および画像からのひび割れ認識性能には大きな差異があることを確認できる(図-2参照)。

④ レーザー距離計

レーザー距離計は、調査台車の設置時に、調査装置と撮影対象物までの距離を簡易に測定し、調査台車と撮影対象が概ね平行に設置されていることを確認するものである。

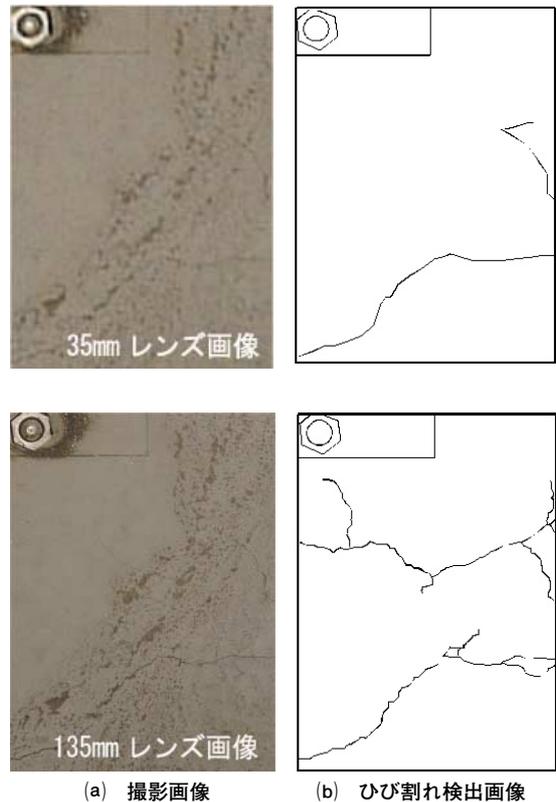


図-2 使用レンズの違いによるひび割れ認識性能

(2) 調査装置

トンネル覆工コンクリートを調査対象とした場合の調査手順の概要を図-3に示す。

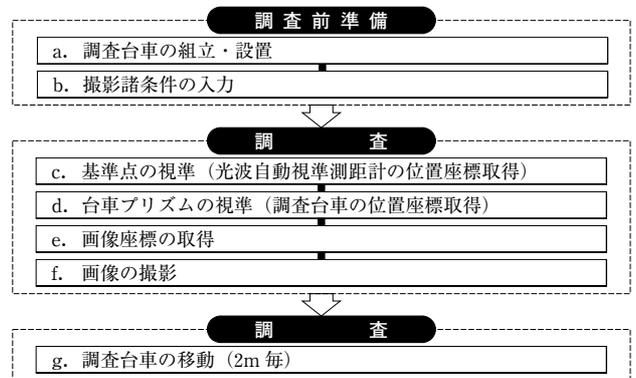


図-3 調査手順の概要

① 調査前準備

a. 調査台車の組立・設置

調査トンネルの中央、または任意の側線上(道路トンネルなど供用中の場合)に測定基準線を設定し、調査台車を組立て設置する。

b. 撮影諸条件の入力

調査対象トンネル名や日時、トンネルの平面・縦断線形、断面寸法、基準点座標、撮影画角などを入力する。また、撮影基点を2m毎に設定する。

② 調査

c. 基準点の視準

光波自動視準測距計を使用して、トンネル内に設置した2つの既知基準点（既知座標 X, Y, Z）を自動視準し、光波自動視準測距計の位置座標を取得する。

d. 台車プリズムの視準

調査台車の位置座標を取得するため、光波自動視準測距計によって台車前後に取付けたプリズムを自動視準する。なお操作は全て制御ソフトで自動化されている。

e. 画像座標の取得

光波自動視準測距計によって画像中央までの距離と角度を計測し、画像の座標値を取得する。

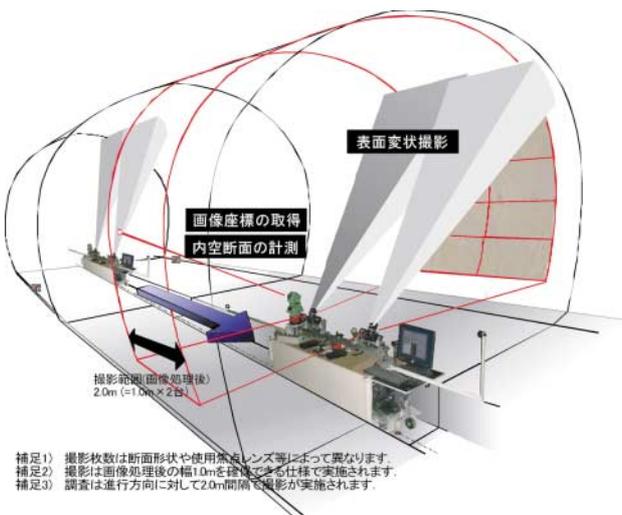
f. 画像の撮影

制御ソフトを利用して、2台のデジタルカメラをトンネル円周方向に回転・撮影させることで、幅2mの断面画像を取得する。

③ 移動

g. 調査台車の移動

1回の撮影後、調査台車をトンネル軸方向へ2m移動し、撮影を繰り返す。1回の撮影から移動までの時間は3分程度であり、1時間当たり40m（300～400m/日）程度の撮影が可能である。また、調査に必要な人員は2～3名程度である。トンネルを対象とした場合の調査イメージを図-4に示す。



補足1) 撮影枚数は断面形状や使用レンズ等によって異なります。  
 補足2) 撮影は画像処理後の幅1.0mを確保できる仕様で実施されます。  
 補足3) 調査は進行方向に対して2.0m間隔で撮影が実施されます。

図-4 調査イメージ

(3) 撮影画像合成

① 画像自動合成システムの開発目的

実現場において撮影した画像は任意に合成し、変状展開図のフォーマットに貼り付ける必要がある。貼り付け後、ひび割れ等の変状箇所を明記し、展開図を作成する。しかし、画像を1枚毎に人力によって合成することは多くの時間を必要とする。例えば、新幹線断面等の大断面トンネル覆工コンクリートを調査対象とした場合、撮影画像は幅1mの1断面あたり21枚（撮影条件：トンネル円周方向にカメラレンズ85mmで撮影し、撮影角度9°、撮影範囲180°とした場合）となる。さらに、トンネル延長方向に1km撮影した場合、21枚/m×1,000m

=21,000枚となる。この画像合成作業を迅速化し、変状展開図の作成時間を大幅に短縮することを目的として、画像自動合成ソフトを開発した。

② システムの概要

画像自動合成ソフトの構造概要を図-5に、画像合成の処理イメージを図-6に示す。

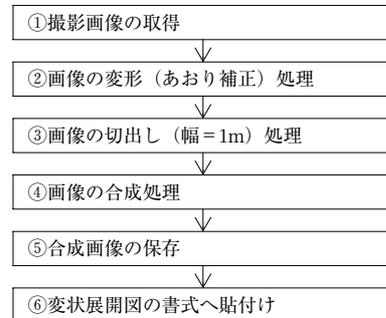


図-5 自動合成システムの構造概要

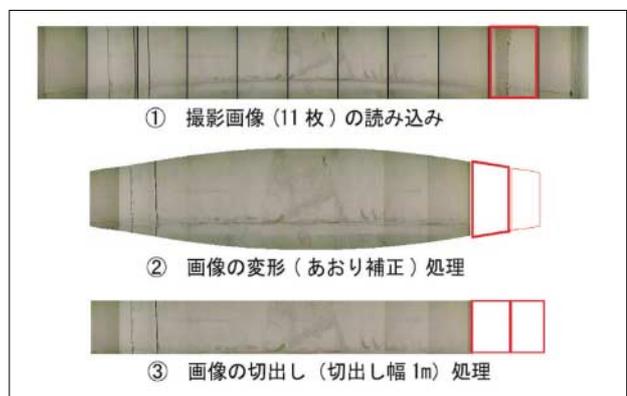


図-6 画像合成の処理イメージ

合成処理の過程において、撮影時に光波自動視準測距計によって取得した画像中心までの距離と座標を利用している。画像中心までの距離と使用レンズから撮影画像の大きさを求め、画像四隅の座標を算出し隣り合う画像をソフト上で自動的に合成（結合）するものである。また、画像合成の前処理として画像の変形（以下、あおり補正）処理をソフト上でやっている（図-7参照）。

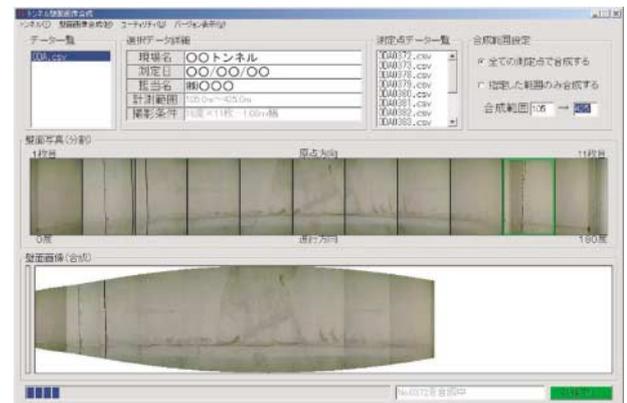


図-7 画像の変形（あおり補正）処理画面

同一画像内においてトンネル覆工コンクリートのようにカメラから撮影対象までの距離が変化する場合、「あおり」が発生する。すなわち、撮影対象物までの距離が長い場合、対象物は小さく写り（撮影範囲は広がる）、距離が短い場合は大きく写る（撮影範囲は狭くなる）。これを修正し、対象物の大きさを同一にする処理を行っている。あおり補正および合成の終了した画像から1m幅の画像を切出し、トンネル軸方向にブロック毎に連結処理する（図-8参照）。

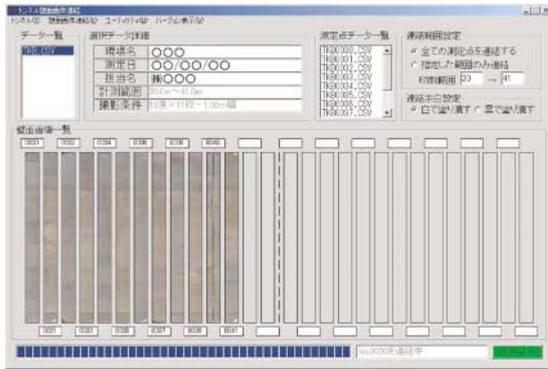


図-8 画像の連結処理画面（トンネル軸方向）

(4) 表面変状展開図の作成

① ひび割れの抽出

現在、ひび割れの抽出およびひび割れ幅の特定を完全自動化することは困難である。そのため、ひび割れの抽出は人力で行うものの、ひび割れを抽出する作業画面において、撮影画像の距離と同縮尺としたひび割れゲージをキャリブレーション用として使用し、ひび割れ幅を特定することとした（図-9参照）。また、抽出したひび割れデータによりひび割れ長さ、ひび割れ密度等の算出を可能にした点が特長である。

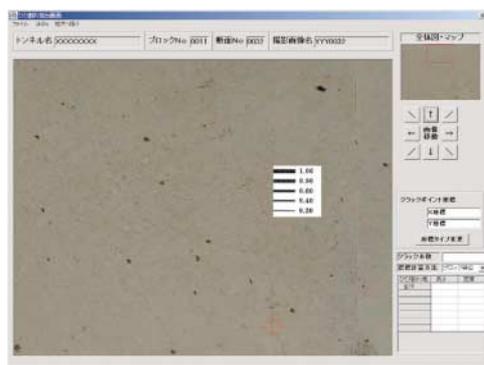


図-9 ひび割れ抽出画面

② 変状展開図の作成

展開図は、企業先毎の様式に対応させるとともに、任意の様式にも対応可能なものとした。各変状項目に関しては、CSV形式データを図形データに変換し、展開図に貼り付けつけることとした。変状展開図の作成例を図-10に示す。また、新幹線トンネルでの調査画像からひび割れを抽出し、幅毎に色分けした例を図-11に示す。

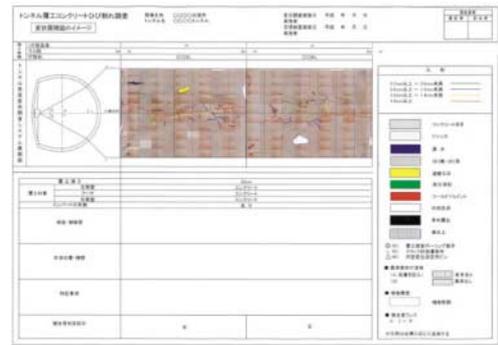


図-10 表面変状展開図

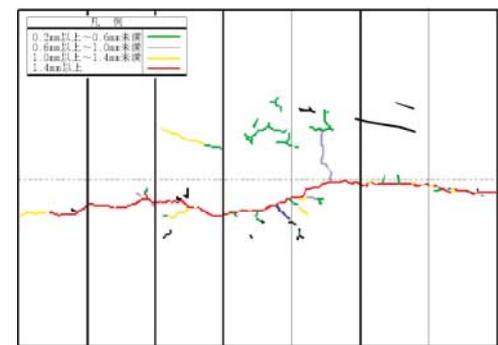


図-11 ひび割れ抽出例

§ 3. 性能確認試験

3-1 実験概要

本調査システム構築後、実トンネルで各種性能確認試験を実施した（写真-2参照）。



写真-2 性能確認試験状況

性能確認試験の主な試験条件および調査対象のトンネル断面を図-12に示す。トンネルクラウン部の一部には乾燥収縮等が原因と推定されるひび割れが発生しており、その区間を中心に延長約400mの調査を実施した。カメラレンズは、試験的に調査区間を区分して4種類(35, 50, 85, 135mm)用いた。

■試験条件	
調査対象物：	トンネル覆工コンクリート
撮影位置：	トンネル中央(中央排水溝内)
撮影距離：	最長約7.3m, 最短4.3m
使用レンズ：	85mm (35, 50, 135mm)
撮影枚数：	21枚 (11, 13, 31枚)
撮影距離：	合計400m
調査人員：	2~3名

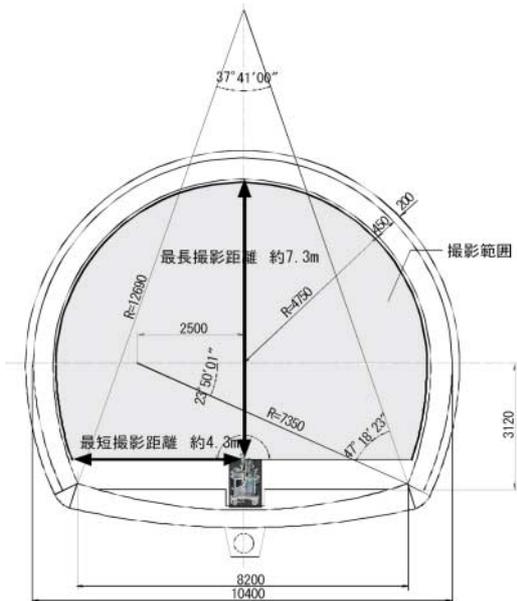


図-12 性能確認試験実施トンネル標準断面図

3-2 実験結果

試験の結果、以下の性能を確認することができた。実験結果の一覧を表-5に、撮影した表面のひび割れ検出状況を写真-3に示す。

- ①制御ソフトからの指令により、光波自動視準測距計はトンネル内の2つの既知基準点および調査台車前後のプリズムを自動視準し、光波自動視準測距計自身と調査台車の位置座標を認識することができた。
- ②デジタルカメラを任意の角度に回転させ、1断面3分程度の撮影時間で行うことができ、調査速度は時間当たり40m程度であった。
- ③光波自動視準測距計は、デジタルカメラでの撮影中に撮影画像の中央部を計測(角度と距離)することで、画像座標を算出し、同時に内空断面を測定することができた。
- ④処理ソフトによる撮影画像の自動合成は、400mを2日で実施できた。
- ⑤0.2mm幅以上のひび割れを認識することができた。

表-5 性能確認試験項目と試験結果

確認項目	確認結果	試験状況
基準点の計測	自動計測可能	計測距離 200m
画像の座標取得	自動取得可能	0.1mm 単位
内空断面の計測	自動計測可能	1° 毎
調査速度	40m/h	400m 調査平均
画像自動合成	自動合成可能	400m / 2日程度
ひび割れ幅の検出	0.2mm 以上	パソコン画面で検出

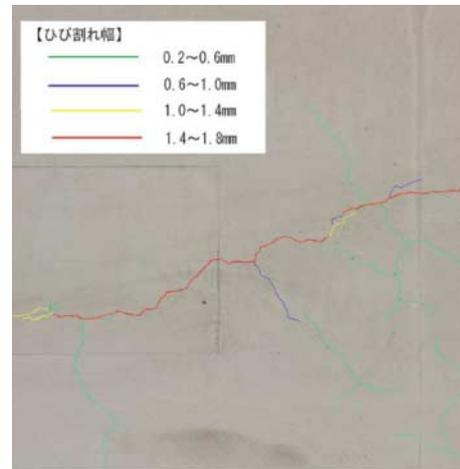


写真-3 性能確認試験状況

§ 4. おわりに

コンクリート構造物の表面変状調査システムの開発においては、実現場における性能確認試験の結果、当初の開発目標を達成することができた。

今後は、曲線部も含めた多種のトンネルでの実績を蓄積していくとともに、高架橋を対象とした性能確認試験を行う予定である。高架橋の調査では、より効率的な調査方法の検討もあわせて実施する。また、コンクリート構造物の健全度評価システム全体の完成を目的とし、劣化進行予測を含めた構造物の健全度を客観的に評価した後、LCCを考慮した最適な補修・補強方法を提案するシステムの開発を実施していく予定である。

謝辞：ソフト開発および性能確認試験にご協力を戴いた現場職員ならびに開発会社の皆様に謝意を表す。

参考文献

- 1) 財団法人 鉄道総合技術研究所：トンネル補強・補修マニュアル，1990。
- 2) 社団法人 日本土木工業協会：コンクリート構造物の維持管理マニュアル，2000。
- 3) 高橋秀樹，椎名貴快，熊谷成之，田中 徹：トンネル覆工コンクリートの表面変状調査システムの開発，電力土木，2003。
- 4) 椎名貴快他：デジタルカメラを用いたコンクリート表面変状調査システムの開発，土木学会第57回年次学術講演会，pp. 385-386，2002。