

走行式コンクリート点検システムの実用化

岡田正美¹・江見裕¹・福本忠浩¹・徳重栄起²
藤原史武²・白子哲夫³・高瀬浩臣⁴・藤崎能正⁴

¹正会員 株式会社 竹中土木 技術本部 (〒104-8234 東京都中央区銀座8-21-1)

²非会員 九州地方整備局 北九州国道工事事務所 (〒802-0803 福岡県北九州市小倉南区春ヶ丘10-10)

³非会員 サンコーコンサルタント株式会社 技術統括部 (〒136-8522 東京都江東区亀戸1-8-9)

⁴非会員 サンコーコンサルタント株式会社 九州支店 技術部 (〒810-0802 福岡県福岡市博多区中州中島町2-3)

トンネル内の覆工コンクリートの落下事故をはじめとするコンクリート構造物の劣化現象が大きな社会問題となっており、多大な労力を投じて欠陥の調査が実施されている。そこで、筆者らは、走行式トンネルコンクリート点検システムとして、ハイビジョンカメラ、サーモグラフィ、電磁波レーダを走行車両に搭載し、走行しながら覆工コンクリートの表面から内部における欠陥情報を迅速かつ高精度に検知する方法について基礎的な研究開発を実施してきた。¹⁾ 本報告は、この研究成果をもとに、全体システムのうち、ハイビジョンカメラおよびサーモグラフィを搭載したトンネル点検専用台車を製作し、その台車を使用して実際の道路トンネルにて調査した結果をまとめたものである。

キーワード: トンネル点検, 調査診断, ハイビジョン, サーモグラフィ, 覆工コンクリート, ひび割れ

1. はじめに

現状、トンネルの覆工コンクリートの通常点検方法は、一般的に目視および打音検査によって実施されている。これらの手法では、多大な労力がかかるだけでなく、その精度が点検技術者の技量によることなどから、さらに合理化や高精度化が求められている。このような状況の中、筆者らは、走行しながら、コンクリート表面から内部に至る欠陥を検知することが可能な走行式トンネルコンクリート点検システムの基礎的研究を京都大学、東京大学、東京工業大学と共同で実施してきた。^{2),3),4),5),6)} 図-1にシステムの概要を示す。本システムは、覆工コンクリートの表面欠陥(ひび割れ、ジャンカなど)をハイビジョンカメラ、表層欠陥(ひび割れの延伸方向、剥離など)をサーモグラフィ、内部欠陥(内部空洞、背面空洞など)を非接触型レーダの3種の検査機器を使用して欠陥情報を検知するものである。また、その欠陥情報を過去の剥落事例などを参考にして作成した剥落危険度フローに従って、剥落の危険性を危険、注意、安全の3段階にわかりやすく表示させようとするものである。本研究では、各種ひび割れや過去の剥落事例などをモデル化して配置した模擬欠陥トンネルにて、実験試作機を用いて検証を実施した。(写真-1)

今回、筆者らは、実際に現在使用されているトンネルにて、本システムの一部を利用して調査を実施し、実用化に至った。本報告では、実用化に向けて熱源などの検討を実施した室内実験の結果および実際のトンネルでの調査結果を報告する。

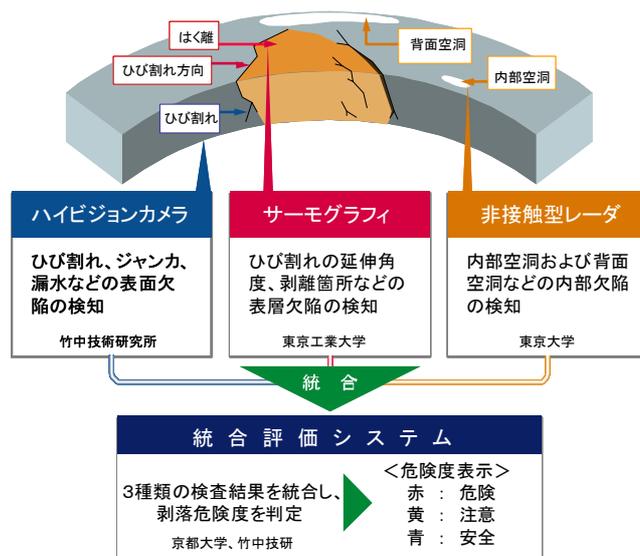


図-1 走行式トンネルコンクリートシステム概要



写真-1 実験試作機による検査状況⁵⁾

2. 走行式コンクリート点検システムの概要

トンネル点検については、一般的に2～5年ごとに実施される定期点検と補修方法などを選定するための詳細点検に区別することができる。本システムについては、両者に適用可能であると考えられるが、今回は、定期点検を目的として実用化を検討した。これは、各事業者において覆工コンクリートの剥落対策の点検が急速に実施されており、今後は、その維持管理を行う上での定期的な点検が重要視されていること、また、トンネル全断面を詳細に点検することは合理的でなく、定期点検により異常が発生した箇所のみを詳細点検することにより、剥落の危険箇所の特特定が可能であると判断したからである。

これらをふまえて、定期点検で一般的に実施されている目視や打音検査と同程度の検査を可能とするハイビジョンおよびサーモグラフィ調査によるコンクリートの表面および表層欠陥の検知方法を検討した。

図-2に本システムの主な点検作業フローを示す。現地では、実際のトンネル形状および目地位置などを把握するために事前測量を実施する。その後、ハイビジョンカメラ、サーモグラフィを搭載した点検専用台車を走行させて、調査を実施する。その調査データから、ひび割れ展開図作成およびひび割れ延伸角度の解析および剥離箇所の特特定などを行い、点検表を作成するものである。

以下に、点検台車および各検査手法において、実用化に際して検討した結果について報告する。

(1) 点検専用台車について

先述したとおり、本システムは、トンネル内を走行して調査することを特徴としており、検査機器を搭載した点検専用台車は必要不可欠である。点検専用台車は、模擬欠陥トンネルにて実施した点検試作機などを参考に製作した。図-3に、点検専用台車の概要を表-1に仕様を示す。点検専用台車は、電気モーターにて駆動し、最大7km/hまで速度調整が可能である。(今回の調査では、ハイビジョン調査5km/h、サーモグラフィ調査2km/hで実施した。)調査箇所の位置情報は、回転式測距計およびレーザー変位計を使用して、台車上に設置したパソコンにてリアルタイムでデータを取り込むシステムになっている。調査は、トンネルの断面方向に対して検査機器を固定し、台車を走行させる方法にて実施した。また、走行専用台車では、トンネルの覆工コンクリートの形状にあわせたレール(ガイド)上を各検査機器、照明および赤外線ヒーターが移動することで、トンネル全断面を調査することが可能である。また、この機器の調整は、台車上のウインチ操作により行った。

(2) ハイビジョンカメラによる表面欠陥検知技術

近年、目視検査にかわる表面欠陥検知方法として、デジタルカメラ、ビデオカメラなどの検査機器を使

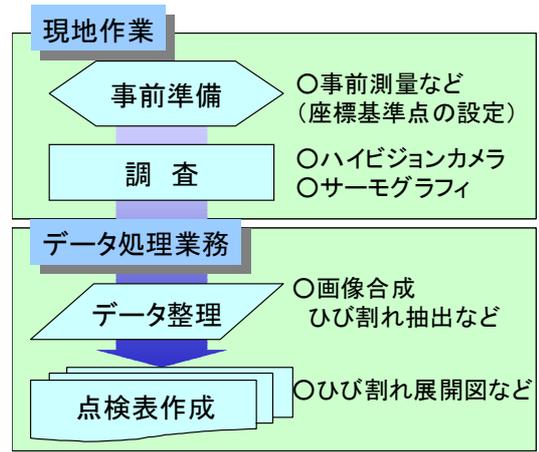


図-2 点検作業フロー

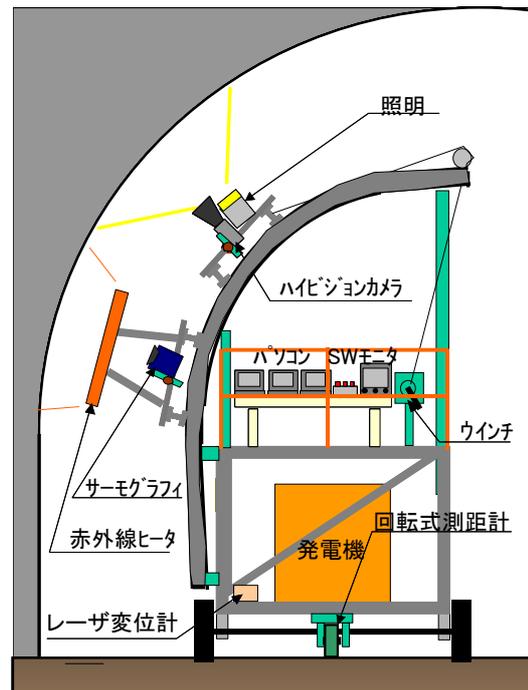


図-3 点検専用台車概要

表-1 点検専用台車の仕様

項目	仕様
車両幅	2.8m
車両長	4.0m
駆動	モーター駆動
速度	1～7km/h(0.28～1.94 m/sec)
位置計測装置	回転測距計、レーザー変位計×2
発電機	25KVA×2
搭載可能な検査機器	ハイビジョンカメラ、サーモグラフィ

用する方法が注目されてきている。筆者らは、解像度、シャッター速度、データ転送速度などの機能が優れたハイビジョンカメラを検査機器に使用することを検討し評価を実施してきた。^{4),5)}その結果、コンクリート表面欠陥(ひび割れ、ジャンカなど)を高精度に検知可能であることが確認されている。本報では、ハイビジョンを使用してひび割れ展開図を

作成する手法の実用化について検討した結果を報告する。なお、図-4にハイビジョンカメラによる表面欠陥検知システムのデータ処理の概要を示す。

a) ハイビジョン画像のキャプチャリング手法の検討

ハイビジョンカメラにより撮影された画像は、動画であるため、展開図とするために静止画像に取り込み(キャプチャー)合成する必要がある。また、動画は1/30秒間隔で撮影されているため、全ての画像を合成すると、処理に多くの時間を要するため合理的でない。そこで、専用点検台車に装着した位置計測装置から得られる情報から、合成するのに必要最小限枚数の画像のみを抽出する手法を検討した。これは、設定したラップ長(画像の重なり合う長さ) L と画像の軸方向の位置情報から式(3)に示すキャプチャー画像の中心座標を算出し、その座標により近い画像を静止画像として取り込む方法である。適切なラップ長を設定することにより、画像の欠損部が発生することなく、効率的に画像を合成することが可能である。また、この処理は、専用のソフトにより自動的に抽出することが可能である。

$$Xc_i^{\text{右}} = (h_2 - L)(i - 1) + h_2 \quad (1)$$

$$Xc_i^{\text{左}} = (h_2 - L)(i - 1) \quad (2)$$

$$Xc_i = (Xc_i^{\text{右}} + Xc_i^{\text{左}}) / 2 \quad (3)$$

但し、 h_2 : 画像幅(mm), L : ラップ長(mm), Xc_i : キャプチャー画像中心座標(mm)とする。

b) 画像座標補正手法の確立

点検専用台車には、回転式測距計およびレーザー変位計が設置されており、その台車の位置情報を取り込んでいるが、調査延長が500~1000m程度となる場合、その精度が問題となる可能性がある。また、調査は、前進、後進にて実施することを想定しているため、そのデータの整合性について検討する必要があった。そこで、トンネルの目地にて、合成画像を補正する手法を検討した。

まず、目地の画像を抽出して、合成作業により得られた目地の座標と測量にて得られた目地座標とのずれ(補正量 m)を算出する。その後、目地間隔(補正間隔)において、式(4)の通り、画像の座標を変換するものである。これにより、画像合成の精度が著しく良好となった。(図-7参照)この処理に関しても専用ソフトにて変換が可能である。

$$X_i^M = X_i \cdot m \cdot \frac{i - 1}{I - 1} \quad (4)$$

但し、 X_i^M : 補正座標, X_i ($i = 1, 2, 3, \dots, i - 1, i, i + 1, \dots, I - 2, I - 1, I$) : 補正前画像座標とする。

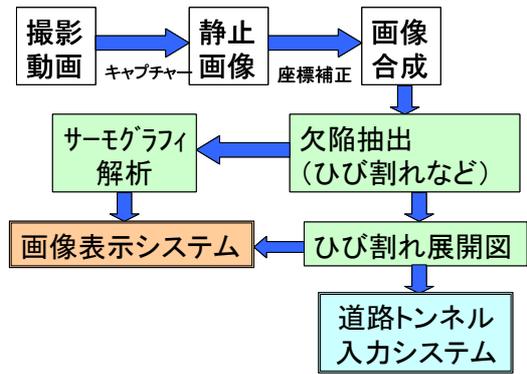


図-4 ハイビジョンデータ処理概要

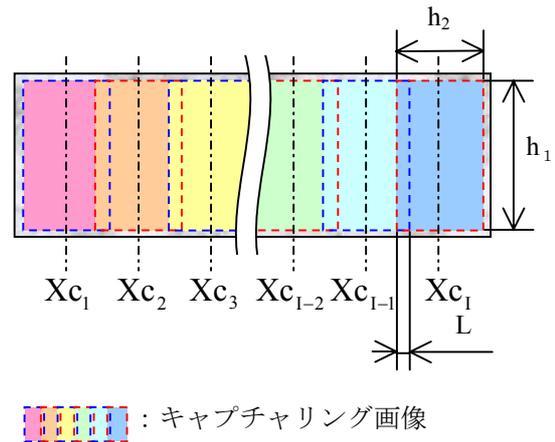


図-5 キャプチャー手法概念図



図-6 合成座標計算プログラム表示例

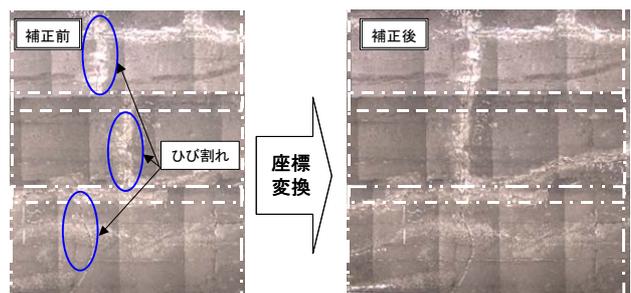


図-7 ひび割れ部補正事例

(3)サーモグラフィによる表層欠陥検知技術

覆工コンクリート表層部の剥落を検知するためには、コンクリートの浮きや、表面から内部に進展するひび割れの角度を知ることが重要になる。コンクリート表面に温度変化を与えると、ひび割れが内部に角度を持って進展した浮きの状態にある場合、浮いている部分は、熱拡散が遅いため、浮きがない部分と温度差が生じる。筆者らは、この原理を利用して、サーモグラフィにより剥離箇所や内部に進展するひび割れ角度を検知する技術を確認した。²⁾

図-8にモデル試験体にて評価した結果を示す。与熱後にサーモグラフィにより測定を実施すると、ひび割れの延伸方向が高温になり、その延伸方向が鋭角なほど、その傾向が大きいことが明らかとなっている。本報では、実用化に際して、与熱するための熱源の検討およびデータ分析手法についての検討を実施した。以下に詳しく示す。

a) 熱源の検討

サーモグラフィにより、ひび割れの延伸方向および剥離箇所の特定をするためには、コンクリート表面の温度を4～6℃程度あげることが必要であり、そのための熱源を選定する必要がある。また、トンネル内には、様々な障害物があることが予想され、覆工面との距離を50cm程度離して与熱可能な機材の選定を実施した。

表-2に、熱源の選定実験に使用した機器の検討結果を示す。コンクリート面の与熱効果を検証した実験では、遠赤外線ヒーターにて与熱した場合が最も短時間で目標温度に達し、その与熱時間は、5秒間であった。その他、安全性および耐久性を考慮して遠赤外線ヒーターを本システムの熱源とした。

本システムは、走行して点検するために、熱源も移動する。そのため、走行速度および熱源の寸法を適切に設定する必要がある。走行台車に搭載可能な熱源の寸法を3mと設定した場合、5秒間与熱するためには、時速2kmで走行する必要があることがわかった。

b) ひび割れ延伸角度の分析および表示方法

ひび割れ延伸角度は、式(5)のとおり定義した上昇温度比とひび割れからの距離との関係で解析することが可能である。

$$\text{上昇温度比(\%)} = \frac{\text{対象部の温度上昇率}}{\text{無欠陥部の表面上昇率}} \quad (5)$$

この分析手法を用いて、ひび割れの延伸方向および角度を自動的に解析して表示させるソフトを検討した。ひび割れの延伸方向をひび割れに対してベクトル形式で表示して、その角度は、色により表現することとした。これにより、剥離の危険性が高いひび割れを評価することが可能である。

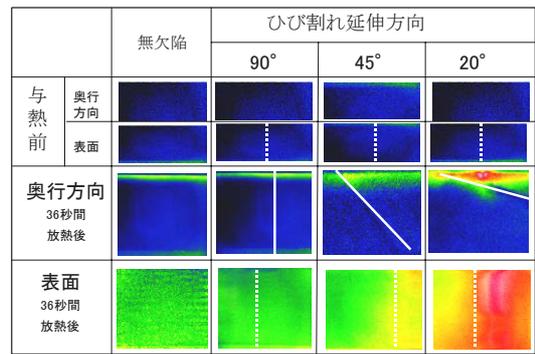


図-8 モデル試験体の表面温度測定結果¹⁾

表-2 熱源機器選定結果

熱源	仕様	与熱時間	均一性	安全性	経済性	耐久性	評価
赤外線ランプ	375W	18	○	○	△	○	×
ジェットヒーター	12000kcal/h	8	△	△	○	△	×
遠赤外線ランプ	5KW	5	○	○	○	○	○

*与熱時間は、表面温度を5℃にするために要する時間(sec)



写真-2 遠赤外線ヒーター

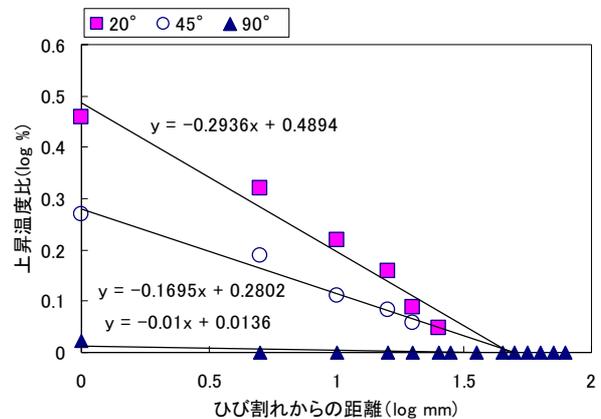


図-9 ひび割れ延伸方向と上昇温度比分布

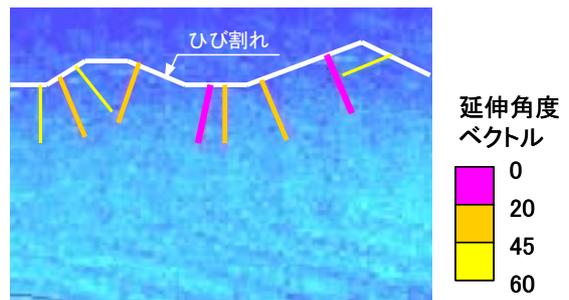


図-10 ひび割れ延伸角度表示例

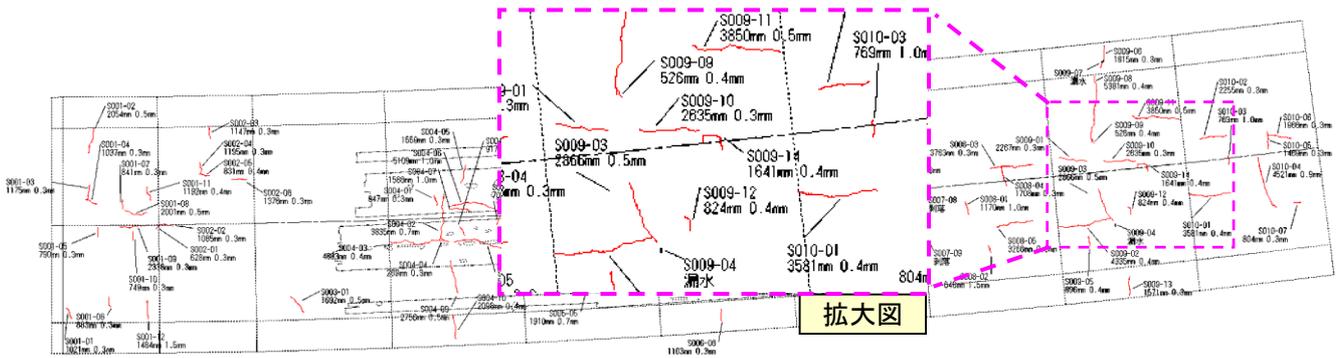


図-1 2 ひび割れ展開図 (調査区間の一部)

表-3 城山トンネル概要

名称	城山トンネル	
所在地	遠賀郡岡垣町大字上畑	
路線名	国道3号線	
車線	2車線	
幅員	道路幅	10.75m
	車道幅	8.0m
高さ	歩道等幅	2.75m
	建築限界高	4.7m
	中央高	7.5m
	有効高	4.7m

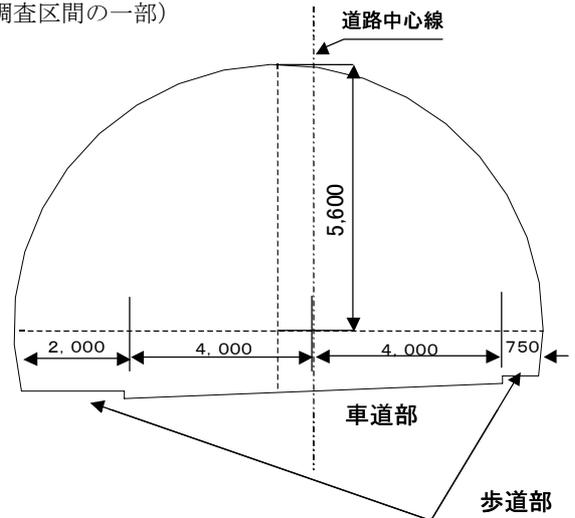


図-1 1 城山トンネル標準断面図

3. 実トンネルへの適用

本システムにより、実際の道路トンネルにて点検を実施した。その概要および調査結果について以下に示す。

(1) 調査トンネル概要

調査したトンネルの概要を表-3に、断面図を図-1 1に示す。城山トンネルは、国道3号線にあるトンネルで、2車線の道路トンネルである。

(2) 調査目的

ハイビジョンカメラによりコンクリート表面欠陥を、サーモグラフィにより表層部の欠陥を検知することを目的として実施した。

(3) 調査工程

現地での調査は、車線規制などの条件もあり、事前測量を含めて5日間夜間作業にて実施した。データ処理、展開図、点検表作成期間は、1ヶ月間で実施した。(表-4 現地作業実績参照)

(4) 調査結果

調査結果については、ひび割れ展開図などを含めた道路トンネル入出力システムに関する点検表を作成した。また、本システムの特長をいかして、欠陥付近のハイビジョン画像およびサーモグラフィ調査結果を表示する画像表示システム作成した。それぞれについて以下に述べる。

表-4 現地作業実績

項目	1	2	3	4	5
走行台車	台車組立				
事前測量	事前測量		事前測量		
ハイビジョン撮影		下り線調査		上り線調査	
サーモグラフィ調査		下り線調査	上り線調査		
車線規制		下り線		上り線	



写真-3 城山トンネル調査状況

a) ひび割れ展開図

図-12にハイビジョン調査より得られたひび割れ展開図を示す。今回の調査において、幅0.2mm以上のひび割れおよび漏水などの欠陥を検知することができた。また、展開図はCADデータにて処理しているため、継続したデータの蓄積により欠陥の進展状況を把握することが可能であり、デジタル化された道路トンネル入力システム（国土交通省）⁷⁾への対応についても容易であった。



図-13 ハイビジョンによる合成画像

b) ハイビジョン画像およびサーモグラフィ解析結果表示システム

図-13にハイビジョンの合成画像をそのひび割れ周辺のサーモグラフィによる調査結果を図-14に示す。ハイビジョン画像においては、さらに拡大して画像を高解像度で表示することが可能であるため、ひび割れ周辺の状況を把握することができた。また、サーモグラフィ結果により、ひび割れの延伸角度が鋭角な箇所を抽出することが可能であった。

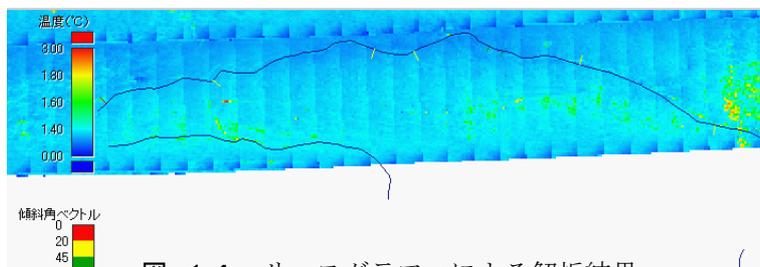


図-14 サーモグラフィによる解析結果

4. まとめと今後の展開

以上の結果をまとめる。

- 1) 走行式コンクリート点検システムのうち、ハイビジョンおよびサーモグラフィにおける調査に関して実用化することができた。
- 2) ハイビジョンによる調査により、幅0.2mm以上のひび割れについて検知することができた。
- 3) サーモグラフィ調査において、ひび割れの延伸角度を解析することができた。

また、従来技術（目視、打音検査）と比較すると、以下のようなメリットがあきらかとなった。

- 1) 近接作業が不要であるので、点検作業において高所作業車などを使用する必要がなく、安全性は高い。
- 2) 走行して点検するため、現地での作業時間は、大幅に短縮可能である。
- 3) 交通規制時間の短縮など、工期短縮の効果により、トータルコストの低減が可能である。
- 4) 点検が点検者の技量にとらわれることなく、高精度に検知可能である。
- 5) 画像表示システムを利用することにより、欠陥の詳細情報を得ることが可能である。
- 6) 情報は、全てデジタルであるので、継続したひび割れの進展などを評価することが可能である。今後は、道路トンネルだけでなく、その他のコンクリート構造物への展開を検討していく。また、点検専用台車については、あらゆる断面に適応可能なスライドアーム方式に改良した。（写真-4）



写真-4 スライドアーム式改良台車

参考文献

- 1) 大野ほか：走行式トンネルコンクリート調査・診断システムの概要，セメント・コンクリート，No. 656，pp68-73，2001
- 2) 浜本ほか：サーモグラフィを用いたトンネルコンクリートの表層部崩落可能性評価に関する基礎的研究，セメント技術大会，No55 pp92-93，2001
- 3) 宮本，魚本：走行式トンネルコンクリート点検システムに関する研究（その1）—ホーンアンテナを用いたレーダ法によるコンクリートの内部性状調査—，土木学会年次講演会，No. 56，pp824-825，2001
- 4) 大野ほか：走行式トンネルコンクリート点検システムに関する研究（その2）—ハイビジョンひび割れ検知システムにおける撮影条件および照明特性の影響—，土木学会年次講演会，No. 56，pp830-831，2001
- 5) 岡田ほか：走行式トンネルコンクリート点検システムに関する研究（その3）—ハイビジョン画像からひび割れを抽出するための最適画像処理方法の検討—，土木学会年次講演会，No. 56，pp832-833，2001
- 6) 朝倉ほか：走行式トンネルコンクリート点検システムに関する研究（その4）—剥落危険度統合評価システムの開発—，土木学会年次講演会，No. 56，pp868-869，2001
- 7) 国土交通省道路局国道課：道路トンネル定期点検要領（案），2002